DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.016
谭豪，脱云飞，冯永钰，等. 四川栗子坪自然保护区不同海拔土壤氮组分垂直特征及季节动态[J].水土保持学报,2024,38(2):234-245.
TAN Hao, TUO Yunfei, FENG Yongyu, et al. Vertical characteristics and seasonal dynamics of soil nitrogen components at different elevations in Liziping Nature Reserve, Sichuan[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):234-245.

四川栗子坪自然保护区不同海拔土壤氮组分垂直特征及季节动态

谭 豪，脱云飞，冯永钰，贺莉莎，畅 翔，陆其伟，何霞红
(西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224)

摘　要:[**目的**]为揭示四川栗子坪国家级自然保护区土壤氮组分(全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮)沿海拔梯度的垂直分布差异及其与理化因子响应关系。[**方法**]于 2022 年 3,6,9,12 月测定并分析四川栗子坪海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 土壤氮组分及理化因子的垂直变化特征,并采用多变量方差分析及冗余分析法,分析环境因子与氮组分的关系及季节动态。[**结果**](1)海拔、季节及交互作用对土壤氮组分有显著影响,3,6,9,12 月铵态氮含量表现为海拔 2 100 m>2 400 m>1 800 m>2 700 m,硝态氮含量表现为海拔 2 400 m>2 100 m>2 700 m>1 800 m,沿月份梯度增加,全氮含量呈增加趋势,水解氮、铵态氮、硝态氮含量呈先减后增趋势,12 月全氮和硝态氮含量有最大值分别为 1.25 g/kg 和 8.26 mg/kg,3 月水解氮和铵态氮含量有最大值 185.14,5.80 mg/kg。全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮沿土层变化规律有一致性,呈“V”形;(2)不同季节和海拔理化因子垂直变化特征与氮组分差异较大,土壤全磷、有效磷、速效钾含量沿土层深度增加先增后减;(3)影响土壤氮组分的关键因子存在季节差异,3,12 月为有机质、非毛管孔隙度、速效钾、全磷、有效磷和毛管孔隙度,6,9 月为有机质、全钾、毛管孔隙度、全磷和速效钾。[**结论**]研究结果为自然保护土壤养分对海拔和季节响应机制及生态保护综合治理提供具体生产实践依据。

关键词:不同海拔;土壤氮组分;季节动态;环境因子;冗余分析法;自然保护区
中图分类号:S153.6　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0234-12

Vertical Characteristics and Seasonal Dynamics of Soil Nitrogen Components at Different Elevations in Liziping Nature Reserve, Sichuan

TAN Hao, TUO Yunfei, FENG Yongyu, HE Lisha, CHANG Xiang, LU Qiwei, HE Xiahong
(*Ecology and Environment Department in Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*)

Abstract:[**Objective**] To reveal the vertical distribution differences of soil nitrogen components (total nitrogen, hydrolyzed nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen) in Liziping National Nature Reserve in Sichuan Province and their relationships with physicochemical factors. [**Methods**] In March, June, September and December 2022, the vertical variation characteristics of soil nitrogen components and physicochemical factors at altitudes of 1 800 m, 2 100 m, 2 400 m and 2 700 m in Liziping, Sichuan Province were determined and analyzed, and the relationship between environmental factors and nitrogen components and their seasonal differences were analyzed by multivariate analysis of variance and redundancy analysis. [**Results**] (1) Altitude, season and their interaction had significant effects on soil nitrogen composition, and in March, June, September and December the ammonium nitrogen content was 2 100 m>2 400 m>1 800 m>2 700 m above sea level, and the nitrate nitrogen content was 2 400 m>2 100 m>2 700 m>1 800 m above sea level, and the gradient increased over the month, the contents of total nitrogen and nitrate nitrogen showed a trend of increasing first, with the maximum content of total nitrogen and nitrate nitrogen being 1.25 g/kg and 8.26 mg/kg, respectively, in December, and the maximum content of hydrolyzed nitrogen and ammonium nitrogen in March being 185.14 mg/kg and 5.80 mg/kg respectively. The variation of total nitrogen, hydro-

收稿日期:2023-09-08　　**修回日期:**2023-10-13　　**录用日期:**2023-11-10　　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-01-25
资助项目:四川省栗子坪国家级自然保护区陆生动物生境调查研究项目(2021ZD0125);国家自然科学基金项目(51979134);2021 年度云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-077);云南省基础研究重点项目(202201AS070034);云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0164);云南省重大科技项目(202102AE090042);昆明市重大科技项目(2021JH002)
第一作者:谭豪(1999—),男,硕士研究生,主要从事生态环境治理及修复研究。E-mail: th532128@163.com
通信作者:脱云飞(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事生态环境治理及修复研究。E-mail:tyunfei@163.com

lyzed nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen along the soil layer was consistent, and formed a "V" shape. (2) The vertical variation characteristics between physicochemical factors and nitrogen components in different seasons and altitudes were significantly different, and the contents of total phosphorus, available phosphorus and available potassium increased first and then decreased along the depth of soil layer. (3) Seasonal differences in the key factors affecting soil nitrogen composition, organic matter, non-capillary porosity, available potassium, total phosphorus, available phosphorus and capillary porosity in March and December, and organic matter, total potassium and capillary porosity, total phosphorus and available potassium in June and September. [**Conclusion**] This study provides a specific production practice basis for the response mechanism of soil nutrients to altitude and season and the comprehensive management of ecological conservation in nature reserve.

Keywords: different altitudes; soil nitrogen components; seasonal dynamics; environmental factors; redundancy analysis; nature reserve

Received: 2023-09-08　　**Revised**: 2023-10-13　　**Accepted**: 2023-11-10　　**Online**(www.cnki.net): 2024-01-25

中国森林占全球陆地表面的 5%，为防止森林生物多样性下降及生态系统功能退化，中国扩增国家级自然保护区[1-3]。土壤氮组分作为自然保护区森林土壤重要组成部分[4]，不仅影响森林土壤氮素转化[5]，而且与环境因子联系密切[6]。氮素不仅是植物生长不可缺少养分元素之一，对植物生长具有十分重要的影响，也是土壤肥力的重要基础，森林生态系统初级生产力的主要限制因子之一，对植被发育和全球气候变化具有重要影响[7-10]。土壤全氮是土壤各种形态氮素之和，是土壤肥力和生物地球化学循环的重要指标[11-12]，全氮大部分是有机氮，该部分经微生物矿化为无机氮，才可被植物吸收利用[13-14]。不同海拔梯度土壤养分是影响全氮储量最重要的因素，土壤全磷全钾是土壤肥力和质量的重要指标[15-16]，由土壤养分供应归还和植被吸收利用之间平衡决定[17]，土壤有效磷是植物吸收磷素直接形态[18]，速效钾可被植物直接吸收利用，反映土壤的供钾能力[19-20]。王晓胡等[21]和李珊珊等[22]研究认为，不同海拔梯度水热因子诱导森林凋落生态系统中硝化微生物活性和分解速率，进而影响氮组分占比变化；李聪等[23]研究文山典型亚热带森林土壤氮组分与海拔梯度和环境因子的耦合关系表明，速效磷和速效钾是影响水解氮的重要因素。土壤有机质对生态系统和生态功能至关重要[24]，有机碳是有机质的重要组成部分。宫立等[25]研究认为，不同海拔土壤有机碳与全氮呈正相关($p<0.05$)；马寰菲等[26]研究不同海拔土壤—植物—凋落物化学计量特征表明，土壤铵态氮和硝态氮对土壤 C∶N 具有重要响应；杨起帆等[27]研究官山常绿阔叶林活性氮组分特征发现，土壤水分是影响活性氮组分的重要因子；车明轩等[28]通过冗余和相关，分析研究川西高山灌丛草甸土壤氮、磷组分分布特征发现，铵态氮和硝态氮与土壤 pH 呈负相关。海拔梯度理化性质对土壤氮组分存在显著影响。

有关土壤氮组分研究主要集中在不同耕作改良措施[29-30]、有机肥和无机肥配施[31-32]、化学改良剂[33-34]、模拟氮沉降[35-36]及其植被恢复措施[37-38]等方面，不同海拔土壤氮组分和土壤物理化学性质耦合关系如何，以及不同季节尺度土壤氮组分与理化因子响应机制是否有差异，需展开研究阐明。本文以四川栗子坪国家级自然保护区为研究对象，研究 3，6，9，12 月氮组分随海拔和土层的变化，以及不同海拔土壤理化性质(土壤容重、毛管孔隙、非毛管孔隙、土壤含水率、全磷、全钾、有效磷、速效钾、土壤 pH)同土壤氮素(全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮)的关系，以期为自然保护区土壤养分对海拔和季节响应机制及生态保护综合治理提供具体生产实践依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

四川栗子坪国家级自然保护区位于横断山区东缘部分、四川盆地西南缘的大渡河中上游、贡嘎山东南面石棉县境内，东经 102°10′33″—102°29′07″，北纬 28°51′02″—29°08′42″(图 1)。南北长 23 km，东西宽 17.8 km，总面积 47 940 hm^2。研究区以亚热带季风气候为基带的山地气候为主[39]，年平均气温 11.7～14.4 ℃，年气温、日气温变幅小，多年平均降水量 1 050 m，春夏季长秋冬季短，冬春干燥。地貌以中高山为主，兼部分低山和河谷阶地。整个地势由西南向东北倾斜，地形切割破碎，起伏跌宕，垂直高差大。植被类型以亚高山灌丛、亚高山寒温带针叶林、高山灌丛草甸、山地针阔叶混交林，以及山地常绿针叶林为主，最高海拔为 4 551 m，最低海拔为 1 330 m，土壤主要类型为山地黄棕壤(1 800～2 000 m)、山地棕壤(2 000～2 500 m)、山地暗棕壤(2 400～2 800 m)、棕色森林土(2 800～3 500 m)、亚高山草甸土(3 500～3 700 m)和高山草甸土(海拔 3 700 m 以上)。

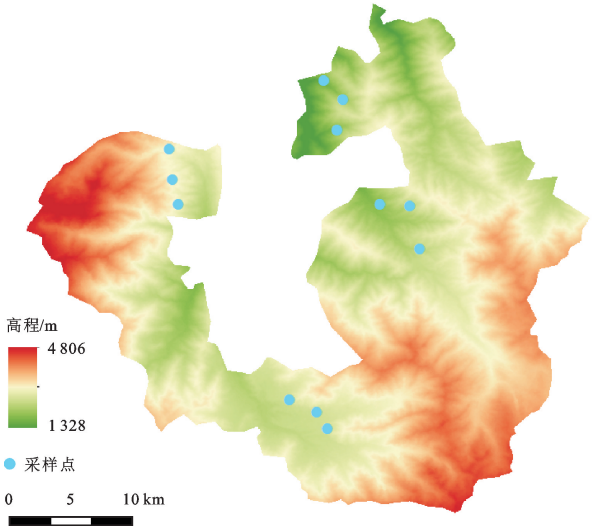


图 1 研究区地理位置和采样点位分布

Fig. 1 Geographical location and sampling map of the study area

1.2 样地设置与样品采集

根据栗子坪国家级自然保护区土壤植被分布特征,2022 年 3,6,9,12 月在海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 分别布设 4 个样地,样地基本概况见表 1。每个样地分别布设 3 个采样点,地形、地貌、坡度、坡向等基本一致,共计布设 12 个采样点(图 1)。每个采样点布设 20 m×20 m 样方,在每个样方对角线划出 3 个 1 m×1 m 土壤采集小样方,除去土壤表面枯枝落叶,用 100 cm^3 环刀分别采集 0—10,10—20,20—30 cm 土层土壤样品,贴好标签用保鲜膜密封,共计 36 个环刀,测定土壤含水率、孔隙度、非毛管孔隙度、容重等物理指标。其次用兵工铲在环刀周围对 3 个重复样方各层取土,剔除石砾和根系等杂物,将相同土层 3 个土样均匀混合装入有编号自封袋中,共采集 36 个土壤样品,土样均避光保存,尽快带回实验室。取 600 g 新鲜土样冷藏于 4 ℃冰箱,用于铵态氮、硝态氮、pH 测定,将 1 000 g 自然风干土壤研磨过 2,1,0.25 mm 筛子,装入自封袋中,用于全氮、水解氮、全钾、速效钾、全磷、有效磷、有机质含量测定,每个土壤样品设置 3 个重复,取其平均值作为化学指标。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic overview of sample plots

海拔/m	土壤类型	植被类型	坡向	坡度/(°)	地貌	盖度/%
1 800	山地黄棕壤	亚热带山地常绿阔叶林	东南	15	河谷	50~60
2 100	山地棕壤	亚热带山地常绿落阔混交林	东南	16	河谷	50~60
2 400	山地棕壤	亚热带山地常绿落阔混交林	东南	16	河谷	50~60
2 700	山地暗棕壤	亚热带针叶落叶阔叶混交林	东南	15	河谷	60~70

1.3 指标测定

土壤理化指标测定参照《土壤农化分析与环境监测》[40],全氮含量采用半微量开氏蒸馏法测定,水解性氮用碱解扩散法测定,铵态氮含量用 KCL 浸提—靛酚比色法测定,硝态氮含量用酚二磺酸光度法测定,全磷含量采用硫酸—高氯酸氧化钼锑抗比色法测定,有效磷含量采用氟化铵—盐酸浸提钼锑抗比色法测定,全钾含量采用氢氧化钠熔融火焰光度法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提火焰光度法测定,有机质含量采用油浴加热重铬酸钾容量法测定,pH 采用电位法测定,土壤含水率采用烘干法测定,容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度采用环刀法测定。

1.4 数据分析

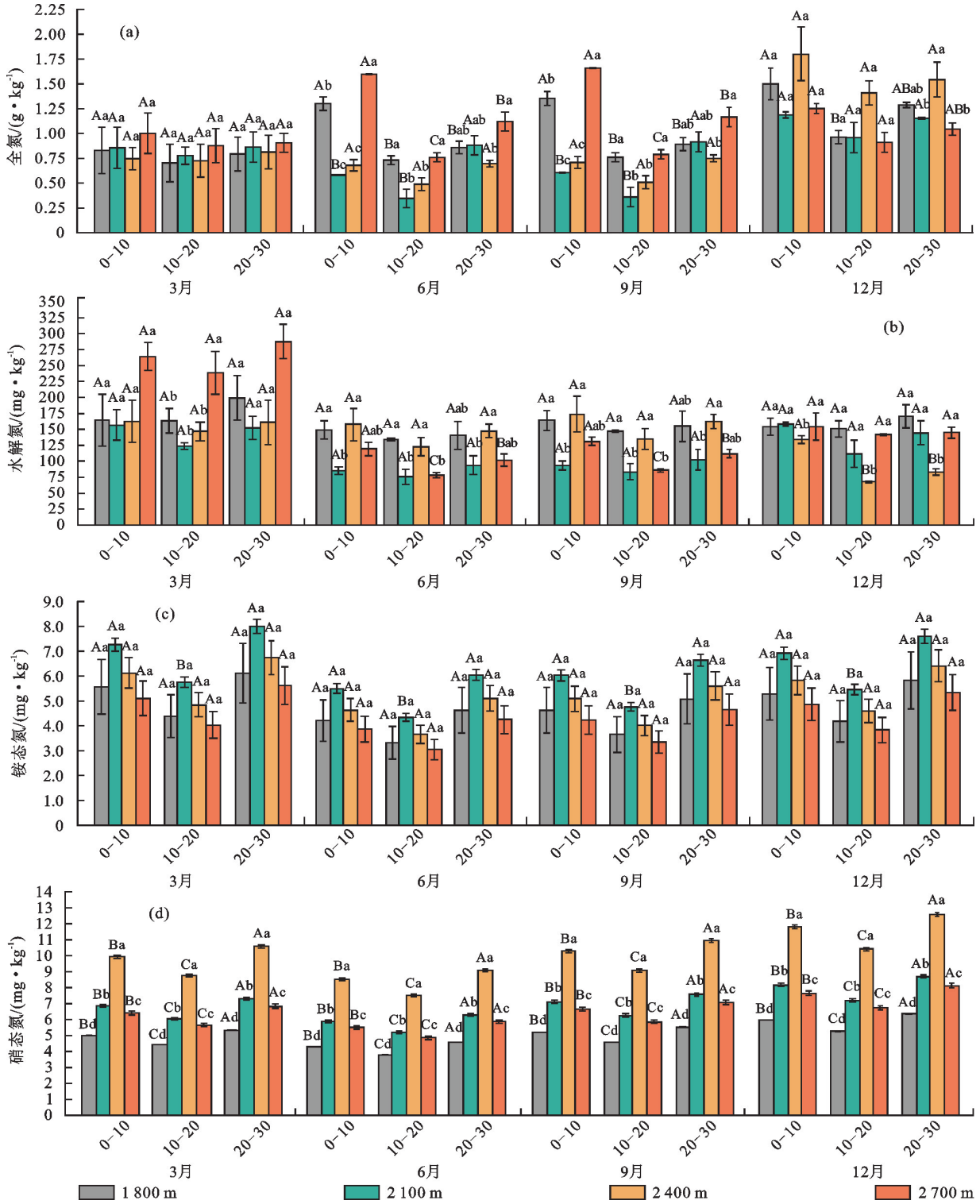
采用 Microsoft Excel 2013 软件对原始数据进行处理和统计,利用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析(One way Anova)和多变量方差分析,使用 Origin pro 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同季节土壤氮组分垂直响应特征

3 月土壤全氮含量差异不显著($p>0.05$),变化范围为 0.70~0.91 g/kg;6,9 月全氮含量差异显著($p<0.05$),6,9 月 0—10,10—20 cm 土层海拔2 100,2 400 m 全氮含量显著小于海拔 1 800,2 700 m($p<0.05$),0—10,10—20 cm 土层全氮含量变化表现为 6 月海拔 2 100 m(0.58,0.35 g/kg)和 2 400 m(0.68,0.49 g/kg)<1 800 m(1.30,0.73 g/kg)和2 700 m(1.60,1.76 g/kg),9 月海拔 2 100 m(0.61,0.36 g/kg)和 2 400 m(0.71,0.51 g/kg)<1 800 m(1.35,0.76 g/kg)和 2 700 m(1.66,0.80 g/kg),20—30 cm 土层海拔 2 700 m 全氮含量显著大于其他海拔($p<0.05$);12 月 0—10,10—20,20—30 cm 土层全氮含量在海拔 2 400 m 分别有最大值 1.80,1.41,1.54 g/kg。3,6,9,12 月海拔 1 800,2 100,2 400 m 全氮含量沿土层深度先减后增,在 10—20 cm 土层有最小值(图 2a)。3 月 0—10,20—30 cm 不同海拔水解氮含量无显著差异($p>0.05$),10—20 cm 土层海拔 2 700 m 水解氮含量(33.73 mg/kg)显著高于其他海拔($p<0.05$),海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 不同土层深度水解氮含量无显著差异($p>0.05$);6,9 月在 0—10,10—20,20—30 cm 土层不同海拔水解氮含量差异显著($p<0.05$),表现为海拔 2 100 m 显著小于其他海拔;12 月 0—10,10—20 cm 土层 2 400 m 海拔水解氮含量显著小于其他海拔($p<0.05$),海拔 2 400 m 海拔 0—20 cm 土层水解氮含量显著低于其他土层($p<0.05$)。3 月水解氮含量较其他月份高,海拔2 700 m 下 0—10,10—20,20—30 cm 土层最高水解氮含量(264.37,238.74,287.50 mg/kg)分别是 6 月最低水解氮含量(119.44,78.10,101.92 mg/kg)的 2.21,3.06,2.82 倍,3,6,9,12 月中间土层水解氮含量低于其他土层(图 2b)。3,6,9,12 月海拔 2 100 m 铵态氮含量沿土层深度差异显著($p<0.05$)(图 2c),海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 铵态氮含量沿土层深度增加呈明显“V”形变化,3,6,9,12 月 0—10,10—20,20—

30 cm 土层硝态氮含量变化表现为 2 400 m>2 100 m>2 700 m>1 800 m($p<0.05$);海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 硝态氮含量变化表现为 20—30 cm>0—10 cm>10—20 cm 土层($p<0.05$)(图 2d)。



注:图中不同大写字母表示同一海拔、不同土层差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同土层、不同海拔差异显著($p<0.05$),土层单位为 cm。

图 2　不同季节氮组分垂直变化特征

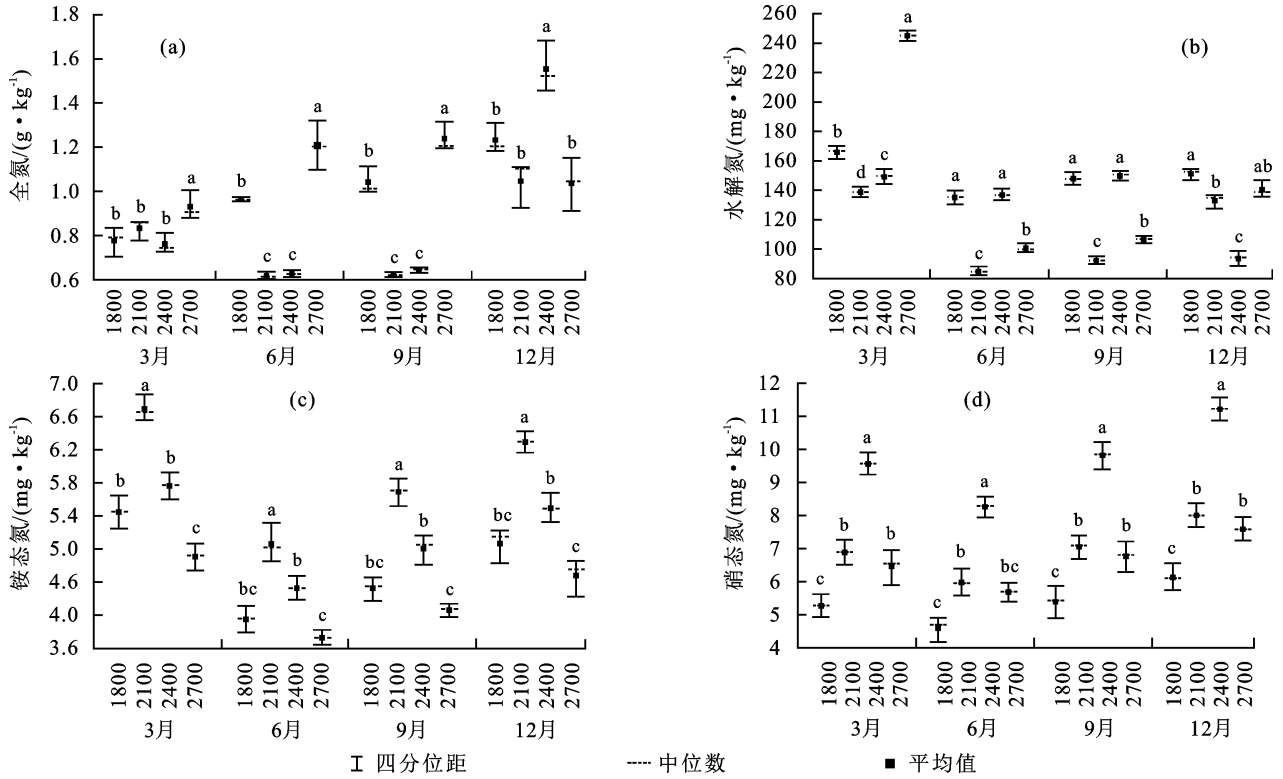
Fig. 2　Characteristics of vertical changes of nitrogen components in different seasons

2.2　不同季节土壤氮组分随海拔分布特征

各氮组分含量变化特征见图 3。3,6,9,12 月不同海拔梯度全氮、水解氮、铵态氮和硝态氮含量差异显著($p<0.05$)。

3,6,9 月海拔 2 700 m 全氮含量最大值(0.93,1.21,1.24 g/kg),6,9 月全氮含量最小值在海拔 2 100 m(0.61,0.62 g/kg),12 月海拔2 400 m 全氮含量最大值 1.54 g/kg;3 月海拔 2 700 m 水解氮含量(263.54 mg/kg)显著大于其他海拔($p<0.05$),6,9,12 月海拔 2 100 m 水解氮含量显著小于其他海拔($p<0.05$);3,

6,9,12 月铵态氮含量变化表现为海拔 2 100 m(7.00,5.30,5.82,6.66 mg/kg)>2 400 m(5.90,4.47,4.90,5.62 mg/kg)>1 800 m(5.35,4.06,4.45,5.10 mg/kg)>2 700 m(4.92,3.72,4.08,4.68 mg/kg);3,6,9,12 月硝态氮含量变化表现为海拔2 400 m(9.77,8.38,10.12,11.62 mg/kg)>2 100 m(6.75,5.80,6.99,8.03 mg/kg)>2 700 m(6.31,5.42,6.54,7.51 mg/kg)>1 800 m(4.93,4.24,5.11,5.87 mg/kg)。



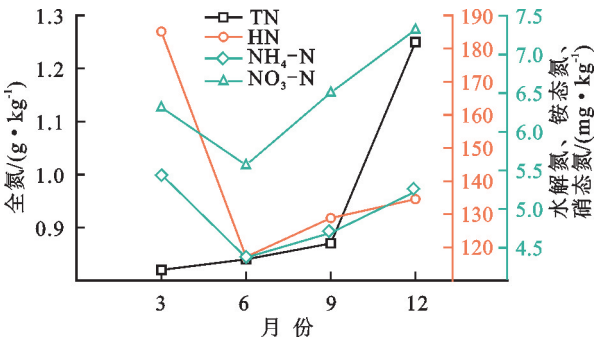
注:图中不同字母表示不同海拔间差异显著($p<0.05$);海拔单位为 m。

图 3 不同季节氮组分含量随海拔分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of nitrogen components in different seasons

2.3 土壤氮组分季节变化特征

水解氮、铵态氮、硝态氮含量随月份梯度增加呈现先减后增趋势,全氮含量呈增加趋势(图 4)。6 月最小值分别为水解氮 117.14 mg/kg,铵态氮 4.39 mg/kg,硝态氮 5.96 mg/kg,水解氮和铵态氮含量在 3 月有最大值 185.14,5.80 mg/kg,全氮和硝态氮含量在 12 月有最大值分别为 1.25 g/kg 和 8.26 mg/kg,12 月全氮含量较 9 月增加 43.68%。



注:TN 为全氮;HN 为水解氮;NH_4—N 为铵态氮;NO_3—N 为硝态氮。

图 4 土壤氮组分季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of soil nitrogen components

2.4 不同季节土壤理化垂直特征

从土壤化学特征(表 2)来看,3,6,9,12 月海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 全钾含量沿土层深度增加先减后增,中间土层出现最小值,同氮组分随土层深度变化趋势相同。土壤全磷、有效磷、速效钾含量随土层深度增加先增后减。3 月 10—20 cm 土层不同海拔全磷含量有显著差异($p<0.05$),6,9 月海拔 1 800,2 100,2400 m 全磷含量随土层无显著差异($p>0.05$),0—10,10—20 cm 土层不同海拔全磷含量差异显著($p<0.05$);6,9 月 10—20,20—30 cm 土层和 12 月 0—10,10—20,20—30 cm 土层海拔2 700 m 有效磷含量显著小于海拔 1 800,2 100,2 400 m($p<0.05$);3,6,9,12 月 0—10,10—20,20—30 cm 土层海拔 2 700 m 速效钾含量高于其他海拔,海拔1 800,2 100,2 400,2 700 m 各土层速效钾含量无显著差异($p>0.05$);3,6,9,12 月,0—10,10—20,20—30 cm 土层不同海拔有机质含量差异显著($p<0.05$),海拔 1 800,2 100,2 400,2 700 m 有机质含量随土层逐渐减小。土壤 pH 在 3,6,9,12 月无显著差异($p>0.05$)。土壤全磷、有效磷、速效钾、pH、有机质垂直变化特征与氮组分差异明显。

表 2　不同季节土壤理化垂直特征

Table 2　Vertical characteristics of soil physicochemical in different seasons

月份	海拔/m	土层/cm	TP/(g·kg^{-1})	AP/(mg·kg^{-1})	TK/(g·kg^{-1})	AK/(mg·kg^{-1})	SOM/(g·kg^{-1})	pH	SMC/%	CP/%	NCP/%	SBD/(g·cm^{-3})
3	1 800	0—10	0.20Aa	25.62Aa	9.12Aa	136.89Aa	22.59Ac	5.59Aa	24.25Aa	52.19Aa	2.33Bc	1.21Aa
		10—20	0.22Aab	30.88Aa	9.09Aa	142.63Aa	21.66Ab	5.46Aa	15.74Bb	53.02Aa	2.48Bb	1.18Ab
		20—30	0.19Aa	27.68Aa	9.13Aa	131.76Aa	19.76Ab	5.52Aa	16.07Ba	50.8Aa	7.05Ab	1.12Ba
	2 100	0—10	0.11Aa	15.83Aa	7.86Aa	127.96Aa	52.52Ab	5.19Aa	22.99Aa	43.56Ab	5.59Ab	1.35Aa
		10—20	0.23Aab	20.71Ab	7.63Aa	133.95Aa	27.28Bb	5.42Aa	18.15Aab	45.43Ab	6.26Aab	1.28ABa
		20—30	0.21Aa	17.96Ab	8.04Aa	126.28Aa	25.22Bb	5.52Aa	16.29Aa	47.260Aab	8.33Ab	1.18Ba
	2 400	0—10	0.14Aa	13.76Aa	8.14Aa	119.48Aa	69.42Aa	6.04Aa	23.60Aa	49.20Aa	5.63Ab	1.20Aa
		10—20	0.15Ab	15.47Ab	7.81Aa	141.43Aa	60.26Aa	6.30Aa	20.33Aab	50.70Aa	5.87Aab	1.15Bb
		20—30	0.13Aa	14.97Ab	8.18Aa	116.42Aa	56.10Aa	5.46Aa	16.29Aa	51.78Aa	6.37Ab	1.11Ca
	2700	0—10	0.27Aa	15.90Ba	16.27Aa	154.59Aa	32.68Ac	5.78Aa	25.65Aa	42.08Ab	8.63Ba	1.31Aa
		10—20	0.27Aa	27.94Aa	16.25Aa	175.38Aa	25.77Bb	5.59Aa	24.54Aa	43.77Ab	9.18Ba	1.25Ba
		20—30	0.27Aa	14.00Bb	16.28Aa	183.27Aa	19.62Cb	5.55Aa	15.85Ba	43.93Ab	14.32Aa	1.11Ca
6	1 800	0—10	0.25Aa	31.60Aa	9.55Cb	141.71Ab	40.24Ab	5.70Aa	28.03Ac	54.75Aa	2.49Bc	1.21Aa
		10—20	0.27Aa	33.32Aa	10.85Bbc	183.27Ab	36.29Ab	5.57Aa	24.7Ab	55.62Aa	2.66Bb	1.20Ab
		20—30	0.22Aa	28.17Aa	14.26Ad	138.73Ab	25.45Ba	5.63Aa	19.61Bb	53.20Aa	7.54Ab	1.14Aa
	2 100	0—10	0.16Ab	31.19Aa	18.59Aa	97.05Ab	62.43Aa	5.30Aa	32.02Ac	45.63Ab	5.98Ab	1.34Aa
		10—20	0.18Ab	34.99Aa	9.88Bc	138.99Ab	30.90Bb	5.53Aa	24.81Bb	47.57Ab	6.7Aab	1.31Aa
		20—30	0.15Aa	28.68Aa	20.45Ab	107.11Ab	25.46Ba	5.63Aa	17.05Cb	49.45Aab	8.91Ab	1.15Ba
	2 400	0—10	0.18Ab	32.51Aa	16.87Ba	108.78Ab	71.66Aa	6.17Aa	32.60Ac	51.54Aa	6.02Ab	1.21Aa
		10—20	0.21Aab	34.70Aa	15.60Ca	122.23Ab	49.5Ba	6.43Aa	29.40Ba	53.12Aa	6.28Aab	1.11Aab
		20—30	0.19Aa	29.78Aa	24.19Aa	116.65Ab	41.83Ba	5.57Aa	28.92Ba	54.25Aa	6.82Ab	1.13Aa
	2 700	0—10	0.30Aa	23.63Aa	16.42Ba	234.75Aa	36.06Ab	5.90Aa	38.16Ad	44.01Ab	9.23Ba	1.29Aa
		10—20	0.20ABab	25.17Ab	11.90Cb	244.31Aa	33.11Ab	5.70Aa	28.72Ba	45.78Ab	9.82Ba	1.25Ac
		20—30	0.17Ba	18.98Ab	22.36Ac	224.36Aa	27.51Aa	5.67Aa	13.62Bc	45.84Ab	15.32Aa	1.16Aa
9	1 800	0—10	0.33Aa	32.82Aa	9.92Cb	148.51Ab	41.85Ab	5.87Aa	30.27Ab	55.11Aa	3.85Bc	1.20Aa
		10—20	0.36Aa	34.61Aa	11.28Bbc	192.06Ab	37.74Ab	5.73Aa	26.68Ab	54.95Aa	5.07Bb	1.18Ab
		20—30	0.29Aa	29.26Aa	14.82Ad	145.39Ab	26.47Ba	5.80Aa	21.18Bb	51.37Aab	11.20Ab	1.13Aa
	2 100	0—10	0.21Ab	32.40Aa	19.31Aa	101.71Ab	64.93Aa	5.46Aa	34.58Aa	46.29Ab	6.87Ab	1.33Aa
		10—20	0.23Ab	36.35Aa	10.27Bc	145.66Ab	32.13Bb	5.70Aa	26.79Bb	48.86Ab	7.04Aab	1.30Aa
		20—30	0.19Aa	29.79Aa	21.25Ab	112.26Ab	26.48Ba	5.80Aa	18.42Cb	50.23Aab	9.88Ab	1.14Ba
	2 400	0—10	0.23Ab	33.77Aa	17.53Ba	114.00Ab	74.53Aa	6.35Aa	35.21Aa	51.99Aa	7.3Ab	1.20Aa
		10—20	0.23Aab	36.05Aa	16.20Ca	128.10Ab	51.48Ba	6.63Aa	31.75Ba	53.54Aa	7.64Aab	1.09Aab
		20—30	0.25Aa	30.93Aa	25.13Aa	122.25Ab	43.51Ba	5.73Aa	31.23Ba	54.49Aa	8.41Ab	1.12Aa
	2 700	0—10	0.38Aa	24.55Aa	17.06Ba	246.02Aa	37.5Ab	6.08Aa	38.54Aa	43.75Ab	11.10Aa	1.28Aa
		10—20	0.23ABab	26.14Ab	12.37Cb	256.04Aa	34.43Ab	5.87Aa	31.01Ba	46.39Ab	10.88Aa	1.24Ac
		20—30	0.22Ba	19.71Ab	23.24Ac	235.13Aa	28.61Aa	5.84Aa	14.71Cc	47.49Ab	15.51Aa	1.15Aa
12	1 800	0—10	0.23Aa	22.55Bb	7.61Ac	66.02Bc	26.48Ab	5.17Bb	23.99Ab	51.56Aa	2.02Bc	1.23Aa
		10—20	0.24Ac	30.94Aa	5.41Ac	129.40Ab	24.49Ab	5.60ABab	21.43Aa	52.43Aa	2.16Ba	1.20Ab
		20—30	0.19Ab	26.94ABa	8.77Ab	51.32Cb	21.83Ab	5.73Aab	17.92Bb	50.86Aa	6.13Ab	1.14Aa
	2 100	0—10	0.19Ba	25.05Ab	11.72Ab	71.94Ab	53.38Aa	5.5Ab	28.91Aab	44.34Ab	3.78Bb	1.37Aa
		10—20	0.32Ac	34.88Aa	10.92Ab	72.50Ad	49.29Ab	5.43Aab	21.63Ba	45.84Ac	4.86ABb	1.31Aa
		20—30	0.16Cb	24.76Aa	13.95Aab	55.05Bb	39.80Ba	5.60Aab	19.20Bb	47.44Aab	7.24Ab	1.20Ba
	2 400	0—10	0.31Ba	30.93Aa	12.96Bb	72.73Bb	75.87Aa	4.87Ab	31.22Aa	48.36Aab	5.54Ad	1.22Aa
		10—20	0.57Ab	33.20Aa	10.73Cb	86.50Ac	71.07Aa	5.13Ab	26.76Aa	49.38Ab	6.31Aab	1.17ABb
		20—30	0.13Bb	27.49Aa	15.55Aab	52.93Cb	68.30Aa	5.13Ab	26.43Aa	50.41Aa	6.89Ab	1.13Ba
	2 700	0—10	0.50Ba	14.08Ac	19.88Aa	150.23Ba	24.29Ab	6.43Aa	25.28Ab	42.20Ab	7.50Ba	1.33Aa
		10—20	0.90Aa	21.87Ab	17.71Aa	165.67Aa	22.98Ab	6.20Aa	18.07Ba	43.43Ad	8.56Ba	1.27Ba
		20—30	0.59Ba	15.23Ab	21.58Aa	146.09Ca	19.93Ba	5.60Aa	10.02Cc	44.95Ab	12.45Aa	1.13Ca

注:表中不同大写字母表示同一海拔不同土层差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同土层不同海拔差异显著($p<0.05$)。

从土壤物理特征(表2)来看,3,6,9,12月海拔1 800 m毛管孔隙度沿土层深度增加先增加后减少,海拔2 100,2 400,2 700 m毛管孔隙度沿土层深度增加而增加,且各土层毛管孔隙度无显著差异($p>0.05$);3,6,9,12月海拔1 800,2 100,2 400,2 700 m质量含水率沿土层减少;3,6,9,12月非毛管孔隙度沿土层增加;6月海拔2 400 m和9月海拔2 100,2 400 m土壤容重沿土层深度先减后增,3,12月海拔1 800,2 100,2 400,2 700 m土壤容重沿土层深度减少;毛管孔隙度、质量含水率、非毛管孔隙度、土壤容重与氮组分垂直变化特征差异较大。海拔、季节影响土壤理化变化特征,土壤理化垂直特征对养分构成中氮组分垂直特征影响较大,土壤氮组分垂直特征同土壤理化垂直特征存在区别和联系。

多变量方差分析(表3)表明,海拔、土层、月份对土壤氮组分有显著影响($p<0.001$),海拔、土层和月份交互作用对土壤氮组分无明显影响,但月份和海拔交互作用对全氮、水解氮和硝态氮有显著影响($p<0.001$),硝态氮对海拔和土层、月份和土层交互作用有显著响应($p<0.001$)。

表3 海拔、土层、月份对土壤氮组分主体间效应检验

Table 3 Tests of intersubject-subject effects of altitude, soil layer and month on soil nitrogen components

差异	TN			HN			NH_4-N			NO_3-N		
来源	Df	F	P	Df	F	p	Df	F	p	Df	F	P
M	3	38.340	<0.001	3	26.780	<0.001	3	12.530	<0.001	3	1270.740	<0.001
A	3	15.200	<0.001	3	11.410	<0.001	3	19.120	<0.001	3	6165.770	<0.001
SL	2	38.310	<0.001	2	7.750	<0.001	2	28.530	<0.001	2	851.670	<0.001
M*A	9	11.340	<0.001	9	9.970	<0.001	9	0.080	1.000	9	27.350	<0.001
M*SL	6	2.600	0.020	6	0.350	0.910	6	0.110	0.990	6	3.780	<0.001
A*SL	6	4.438	0.001	6	0.496	0.810	6	0.172	0.984	6	18.333	<0.001
M*A*SL	18	1.040	0.420	18	0.310	1.000	18	0	1.000	18	0.080	1.000

第1排序轴和第2排序轴合计解释率降序排名78.91%(9月)>78.24%(6月)>75.21%(3月和12月),且月平均合计解释率76.89%,表明3,6,9,12月土壤环境因子可以较好地解释氮组分变化(图5)。3,12月有机质、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、速效钾、全磷、有效磷、毛管孔隙度箭头连线较长,较好解释土壤氮组分差异(图5a)。有机质与硝态氮、铵态氮夹角较小,表明有机质与无机氮呈显著正相关($p<0.05$),非毛管孔隙度与全氮、水解氮呈显著正相关($p<0.05$),速效钾与水解氮呈显著正相关($p<0.05$),全磷与全氮、水解氮呈正相关,全磷与无机氮夹角较大,说明全磷与无机氮呈显著负相关($p<0.05$),有效磷对氮组分有负效应,毛管孔隙度对氮组分有负效应($p<0.05$)。6,9月有机质、全钾、毛管孔隙度、全磷、速效钾箭头连线较长,可较好解释土壤氮组分变化,其中毛管孔隙度和全磷分别与水解氮、全氮夹角较小,表明毛管孔隙度和全磷分别与水解氮、全氮呈显著正相关($p<0.05$),有机质和全钾对无机氮有正效应,速效钾与全氮呈正相关,但对其他氮组分表现为负效应。

3 讨论

3.1 土壤氮组分对土层、季节和海拔深度的响应

氮素作为土壤肥力的重要指标之一,在自然保护区生态系统循环中发挥重要作用。有关自然保护区土壤养分的垂直变化特征研究表明,土壤氮组分随土层深度的增加呈减小趋势。李聪等[23]研究文山亚热带森林土壤氮组分垂直变化特征发现,土壤氮组分含量分布特征表现为0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm>30—40 cm>0—50 cm,表明土壤氮组分对土层深度具有重要响应;钱琦等[41]研究不同海拔武夷山森林土壤特征表明,不同海拔土壤全氮含量表现为10—20 cm<0—10 cm;丁咸庆等[42]研究大围山不同海拔亚热带森林土壤氮素土层垂直分布特征发现,全氮、无机氮、有机氮随土层深度的增加而减小。

本研究深土层氮组分含量较表土层低,研究区内各海拔以阔叶林为主的森林类型为表层土壤覆盖丰富凋落物。此外,表层土壤主要以棕壤为主,说明表层土壤微生物较活跃,促进有机质含量形成。土壤有机质是全氮的主要来源[43],表层土壤微生物固定和转化氮素能力较强,致使氮组分在表层土壤富集,伴随淋溶作用以及土壤微生物活性随土层降低,深土层氮素较表层土壤低,但10—20 cm土层全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮含量较0—10,20—30 cm土层低,可能由于采样点草本植物根系主要集中在中间土层,该植被类型吸收更多无机氮以维持正常生命活动。中间土层磷元素较其他土层高,磷元素常与土壤微生物活性有关,表明中间土层微生物数量较多,微生物加速对氮素分解和转化,但无机氮输入量无法满足植物对其消耗量,使中间土层氮组分较低。

季节变化引起温度、地上植被和土壤养分存在差异[44],夏季植物主要对土壤养分吸收利用[45],冬季大

量枯落物增加有机质来源[46]。本研究 12 月土壤全氮、水解氮、铵态氮和硝态氮较 6 月高,研究区主要优势植被类型产生大量凋落物,12 月温度和湿度较低,对土壤微生物活性有一定影响,但丰富有机质为微生物提供反应底物,微生物对氮素固定和转化能力加强,使土壤氮组分积累,该分析与李聪等[24]对低温、低湿环境下氮组分含量较高解析一致。6 月适宜温度和水分使微生物活动剧烈,植物根系、微生物和凋落物产生更多土壤酶[47],促进氮素分解和转化,但植物对氮素消耗量大于输入量,使土壤氮组分减少。

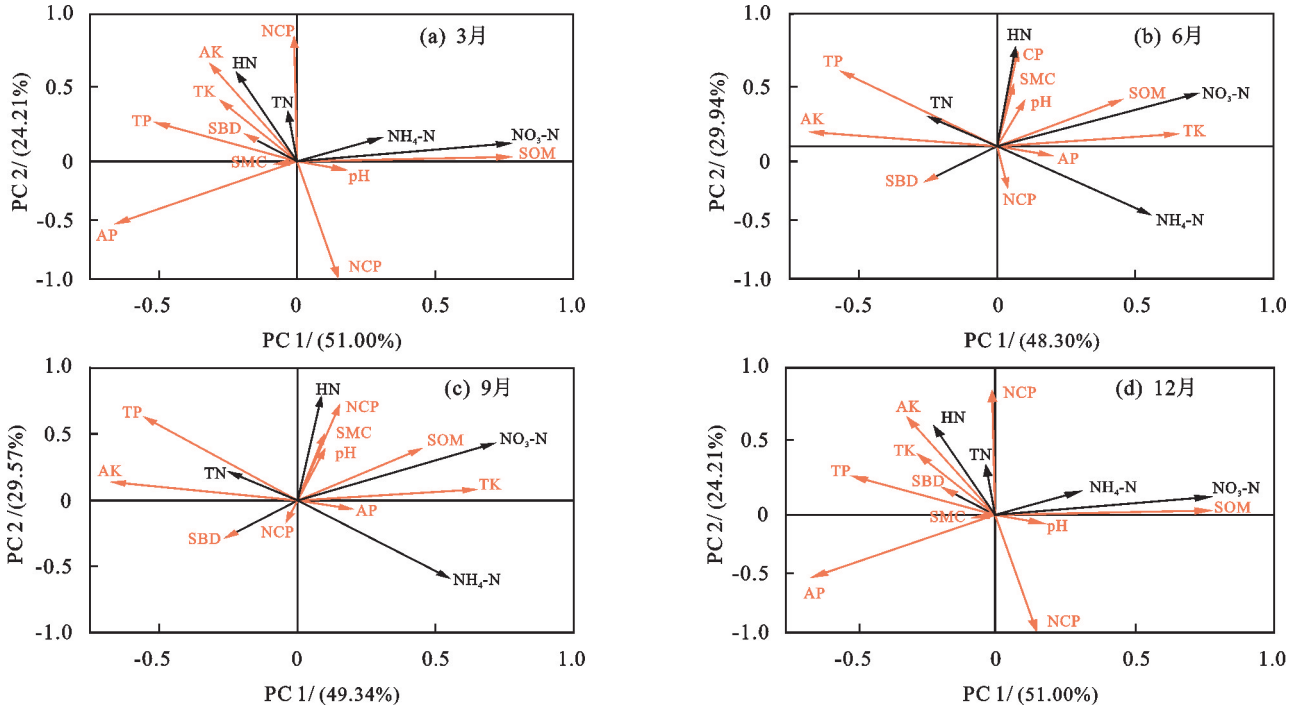


图 5　土壤理化性质与氮组分冗余分析

Fig. 5　Redundancy analysis of soil physicochemical and nitrogen components

海拔通过控制水热因子,进而影响土壤养分变化[48],硝态氮和铵态氮易被植物根系直接吸收利用,无机氮具有维持森林生态平衡中发挥间接或直接作用。杨起帆等[27]研究不同海拔常绿落叶林土壤活性氮组分特征发现,硝态氮含量随海拔梯度的增加先增加后减小,且硝态氮变化规律与本研究一致;元晓春等[49]通过矿质氮预测有机氮发现,铵态氮和硝态氮随海拔梯度的增加呈波浪式变化。本研究无机氮随海拔梯度增加先增加后减小,铵态氮和硝态氮分别在海拔 2 100,2 400 m 有最大值,海拔 2 100,2 400 m 主要植被类型均为亚热带山地常绿落阔混交林,相比亚热带山地常绿阔叶林和针叶林,亚热带山地常绿落阔混交林凋落物更多地被分解,使其土壤肥力升高。海拔 2 100,2 400 m 温度、水分、土壤透气性利于微生物生存和繁殖,促进好氧细菌氨化和硝化作用。在大气氮沉降作用下,产生更多无机氮。海拔 2 400 m 土壤水解氮中可溶性有机氮含量多,释放出的 NH_4^+ 为硝化细菌提供反应底物,从而产生更多硝态氮;海拔 2 100 m 硝化作用也较强,但环境因素和氨化作用使微生物更有利于铵态氮生成,以及反硝化作用较强烈对硝态氮造成损失,所以铵态氮含量比硝态氮高。

植被群落、凋落物、根系分泌物、微生物群落及土壤理化性质等影响土壤氮循环,本研究主要针对不同海拔土壤氮组分对土壤理化响应展开讨论,更多环境因子对自然保护区不同海拔土壤氮组分影响机制需在后续深入研究;只针对 2022 年各季节尺度下自然保护区不同海拔土壤养分研究,但年尺度下各季节土壤养分受到多种环境因素综合作用也容易产生差异,因此需对自然保护区土壤养分进行长期检测,以便发现不同季节土壤养分沿海拔梯度一般规律及提高本研究说服性。

3.2　土壤氮组分和土壤理化因子关系

土壤氮组分并非受单一环境因子影响,而是受多个环境因子综合影响。6,9 月土壤氮组分主要受有机质、全钾、毛管孔隙度、全磷、速效钾影响,而 3,12 月土壤氮组分主要受有机质、非毛管孔隙度、速效钾、全磷、有效磷、毛管孔隙度影响,根本原因是不同季节造成温度、水分等环境因子差异,影响输入土壤养分的数量和成分[50]。3 月和 12 月、6 月和 9 月土壤氮组分对土壤理化响应具有相似性,但研究区域位于川西,春冬低温干燥,夏秋温度较高且湿润,所以 3 月和 12 月土壤氮组分对土壤养分敏感程度同 6 月和 9 月存在差异。值得注意的是,3,6,9,12 月有机质对无

机氮表现正效应,全磷对全氮和水解氮有正效应。有机碳可表征有机质含量,宫立等[25]研究有机碳与氮组分随海拔梯度变化特征发现,有机碳与全氮呈显著正相关($p<0.05$),有机质含量增加,其为氮素分解和转化提供充足反应底物,此外适宜温度和水分促进矿质氮生成,从而产生更多无机氮。磷元素通常参与植物和微生物生命活动,自然保护区氮磷比平均值4.15大于全国平均值3.2[51],说明磷元素受到限制。本研究区域森林郁闭度大,植被生长旺盛,需要大量磷元素,植被为维持氮磷元素平衡,需要不断补充从土壤氮素,因此有机磷和有机氮不断被微生物矿化。毛管孔隙度对降雨、渗水起保持作用,在森林涵养水源功能有重要作用,3,12月毛管孔隙度与全氮、水解氮呈负相关,6,9月毛管孔隙度对全氮、水解氮有正效应,原因是6,9月川西雨季降雨量大,可蒸发量也大,毛管水可为微生物代谢活动和植物生长发育补充水分,促进氮素固定和水解。李聪等[52]研究2018年10月文山典型土壤植被土壤碳氮储量变化特征发现,毛管孔隙度与氮组分呈正相关,而3,12月温度低,土壤毛管水过多可对植物、微生物产生冻害,致使氮素固定和水解能力减弱。

4 结 论

海拔、月份及其交互作用对氮组分有显著影响,海拔和月份通过水热条件影响自然保护区土壤理化,进而引起植物生命活动、微生物活性及底物利用率改变,使不同季节尺度下全氮、水解氮、铵态氮和硝态氮垂直分布特征存在差异。除全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮沿土层变化规律表现为“V”形,3,6,9,12月全氮和水解氮随海拔变化明显不同,铵态氮含量变化表现为海拔2 100 m>2 400 m>1 800 m>2 700 m,硝态氮含量变化表现为海拔2 400 m>2 100 m>2 700 m>1 800 m;沿月份梯度增加,全氮含量呈增加趋势,水解氮、铵态氮、硝态氮含量呈先减后增趋势。此外,环境因子与土壤氮组分作用机制也存在季节差异。

参考文献:

[1] XU Y, PRICE M, YANG B, et al. Have China's national forest reserves designated since 1990 conserved forests effectively? [J].Journal of Environmental Management,2022,306:e114485.

[2] LI B V, PIMM S L. How China expanded its protected areas to conserve biodiversity[J].Current Biology,2020,30(22):1334-1340.

[3] LIU Y Y, ZHAO C Y, LIU X M, et al. The multi-dimensional perspective of ecological security evaluation and drive mechanism for Baishuijiang National Nature Reserve, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 132:e108295.

[4] DENG J J, ZHOU Y B, BAI X J, et al. Soil microbial functional diversity responsesto different revegetation typesinBaishilazi nature reserve[J].Polish Journal of Environmental Studies,2019,28(5):3675-3686.

[5] KANG J, DENG Z B, ZHANG Z R, et al. Relative importance of soil properties and functional diversity to the spatial pattern of the forest soil nitrogen[J].Ecological Indicators,2023,146:e109806.

[6] XU Y M, SMITH S E, GRUNWALD S, et al. Effects of image pansharpening on soil total nitrogen prediction models in South India[J].Geoderma,2018,320:52-66.

[7] 赵晗,王海燕,罗鹏,等.微地形对云冷杉阔叶混交林土壤有机碳和全氮的影响[J].北京林业大学学报,2022,44(8):88-97.
ZHAO H, WANG H Y, LUO P, et al. Effects of micro-topography on soil organic carbon and total nitrogen in mixed spruce-fir-broadleaf forest[J].Journal of Beijing Forestry University,2022,44(8):88-97.

[8] 蔡银美,张成富,赵庆霞,等.模拟根系分泌物输入对森林土壤氮转化的影响研究综述[J].浙江农林大学学报,2021,38(5):916-925.
CAI Y M, ZHANG C F, ZHAO Q X, et al. Effect of simulated root exudates input on soil nitrogen transformation: A review[J].Journal of Zhejiang A&F University,2021,38(5):916-925.

[9] 郭建斌,徐红伟,薛萐.黄土丘陵区撂荒草地不同生态位物种非结构性碳水化合物对氮添加的响应[J].水土保持学报,2022,36(3):153-158.
GUO J B, XU H W, XUE S. Responses of non-structural carbon of different niche species to nitrogen addition in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(3):153-158.

[10] WANG Z G, WANG G C, ZHANG G H, et al. Effects of land use types and environmental factors on spatial distribution of soil total nitrogen in a coal field on the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2021,211:e105027.

[11] 郭澎涛,李茂芬,罗微,等.基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测[J].农业工程学报,2015,31(5):194-200.
GUO P T, LI M F, LUO W, et al. Prediction of soil total nitrogen for rubber plantation at regional scale based on environmental variables and random forest approach[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(5):194-200.

[12] BANGROO S, NAJAR G, ACHIN E, et al. Application of predictor variables in spatial quantification of soil organic carbon and total nitrogen using regression kriging in the North Kashmir forest Himalayas [J]. Catena, 2020, 193:e104632.

[13] 宁朋,程小毛,杨晓锋,等.贡嘎山不同海拔峨眉冷杉根际土壤化学性质及胞外酶活性[J].应用与环境生物学

报,2021,27(5):1138-1146.
NING P, CHENG X M, YANG X F, et al. Chemical properties and extracellular enzymatic activity in the rhizosphere soil of *Abies fabri* at different altitudes on Mount Gongga[J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2021,27(5):1138-1146.

[14] 王华,牛德奎,胡冬南,等.不同肥料对油茶林土壤氮素含量、微生物群落及其功能的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1468-1476.
WANG H, NIU D K, HU D N, et al. Effects of different fertilization on soil nitrogen and microbial community and function in *Camellia oleifera* forest[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2014,20(6):1468-1476.

[15] DENG X, XU X L, WANG S H. The tempo-spatial changes of soil fertility in farmland of China from the 1980s to the 2010s[J]. Ecological Indicators, 2023, 146:e109913.

[16] 任景全,郭春明,刘玉汐,等.吉林省春玉米土地生产潜力时空变化及其与气候因子的关系[J].土壤通报,2017,48(2):270-277.
REN J Q, GUO C M, LIU Y X, et al. Spatial and temporal changes of land potential productivity of spring maize and its relationship with climate factors in Jilin Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2):270-277.

[17] 高浩然,周勇,刘甲康,等.基于信息熵的耕地土壤养分与环境影响因子空间相关性研究[J].水土保持通报,2021,41(6):226-236.
GAO H R, ZHOU Y, LIU J K, et al. Spatial correlation between soil nutrients and environmental factors in cultivated land based on information entropy[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2021,41(6):226-236.

[18] GHOSH A, BISWAS D R, BHATTACHARYYA R, et al. Recycling rice straw enhances the solubilisation and plant acquisition of soil phosphorus by altering rhizosphere environment of wheat[J].Soil and Tillage Research,2023,228:e105647.

[19] SONG X D, LIU F, WU H, et al. Effects of long-term K fertilization on soil available potassium in East China[J].Catena,2020,188:e104412.

[20] 蒲俊宇,李忠义,钟菊新,等.绿肥配施氮肥对岩溶区稻田土壤微生物群落的影响[J].微生物学报,2022,62(6):2417-2432.
PU J Y, LI Z Y, ZHONG J X, et al. Effect of the combination of green manure with nitrogen fertilizer on microbial community in Karst paddy soil[J].Acta Microbiologica Sinica,2022,62(6):2417-2432.

[21] 王晓胡,寇涌苹,赵文强,等.贡嘎山森林土壤氨氧化微生物数量在海拔梯度的空间分异特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(2):275-280.
WANG X H, KOU Y P, ZHAO W Q, et al. Spatial heterogeneity of ammonia-oxidizing microorganisms along the elevation gradient in the forest soil of Mount Gongga[J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019,25(2):275-280.

[22] 李珊珊,耿增超,姜林,等.秦岭火地塘林区土壤剖面碳氮垂直分布规律的研究[J].西北林学院学报,2011,26(4):1-6.
LI S S, GENG Z C, JIANG L, et al. Vertical distribution of carbon and nitrogen at Huoditang forest region in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(4):1-6.

[23] 李聪,陆梅,任玉连,等.文山典型亚热带森林土壤氮组分的海拔分布及其影响因子[J].北京林业大学学报,2020,42(12):63-73.
LI C, LU M, REN Y L, et al. Distribution of soil nitrogen components of Wenshan typical subtropical forests along an altitude gradient and its influencing factors in Yunnan Province of southwestern China[J].Journal of Beijing Forestry University,2020,42(12):63-73.

[24] ONDRASEK G, BAKIĆB H, ZOVKO M, et al. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems and environmental implications[J].The Science of the Total Environment,2019,658:1559-1573.

[25] 宫立,刘国华,李宗善,等.川西卧龙岷江冷杉林土壤有机碳组分与氮素关系随海拔梯度的变化特征[J].生态学报,2017,37(14):4696-4705.
GONG L, LIU G H, LI Z S, et al. Altitudinal changes in nitrogen, organic carbon, and its labile fractions in different soil layers in an *Abies faxoniana* forest in Wolong[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4696-4705.

[26] 马寰菲,解梦怡,胡汗,等.秦岭不同海拔森林土壤-植物-凋落物化学计量特征对土壤氮组分的影响[J].生态学杂志,2020,39(3):749-757.
MA H F, XIE M Y, HU H, et al. Effects of stoichiometric characteristics of soil-plant-litter on soil nitrogen components in different forests along an elevational gradient of Qinling Mountains[J].Chinese Journal of Ecology,2020,39(3):749-757.

[27] 杨起帆,熊勇,余泽平,等.江西官山不同海拔常绿阔叶林土壤活性氮组分特征[J].中南林业科技大学学报,2021,41(9):138-147.
YANG Q F, XIONG Y, YU Z P, et al. Characteristics of soil active nitrogen fractions in evergreen broad-leaved forests at different altitudes in Guanshan Mountain of Eastern China[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2021,41(9):138-147.

[28] 车明轩,吴强,方浩,等.海拔、坡向对川西高山灌丛草甸土壤氮、磷分布的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(5):1163-1169.
CHE M X, WU Q, FANG H, et al. Effects of elevation and slope aspect on soil nitrogen and phosphorus distribution of western Sichuan Plateau shrub meadow[J].

Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021,27(5):1163-1169.

[29] HAO D C, SU X Y, XIE H T, et al. Effects of tillage patterns and stover mulching on N_2O production, nitrogen cycling genes and microbial dynamics in black soil [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345:e118458.

[30] JACOBS A A, STOUT E R, ALLISON J K, et al. Cover crops and no-tillage reduce crop production costs and soil loss, compensating for lack of short-term soil quality improvement in a maize and soybean production system [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218:e105310.

[31] SHI X P, SONG X, YANG J J, et al. Yield benefits from joint application of manure and inorganic fertilizer in a long-term field pea, wheat and potato crop rotation [J].Field Crops Research,2023,294:e108873.

[32] MUHAMMAD Q, HUANG J, WAQAS A, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J].Soil and Tillage Research,2019,198:e104569.

[33] WANG M, WU S, LU Y L, et al. Combined application of strong alkaline materials and specific organic fertilizer accelerates nitrification process of a rare earth mining soil[J].The Science of the Total Environment,2023,879:e163042.

[34] MARCZAK D, LEJCUŚ K, KULCZYCKI G, et al. Towards circular economy: Sustainable soil additives from natural waste fibres to improve water retention and soil fertility[J].The Science of the Total Environment, 2022,844:e157169.

[35] FAN D Y, DANG Q L, YANG X F, et al. Nitrogen deposition increases xylem hydraulic sensitivity but decreases stomatal sensitivity to water potential in two temperate deciduous tree species[J].The Science of the Total Environment,2022,848:e157840.

[36] ZHANG W T, TAO X P, HU Z Y, et al. The driving effects of nitrogen deposition on nitrous oxide and associated gene abundances at two water table levels in an alpine peatland[J].The Science of the Total Environment, 2023,898:e165525.

[37] YANG R Z, YANG S L, CHEN L L, et al. Effect of vegetation restoration on soil erosion control and soil carbon and nitrogen dynamics: A meta-analysis[J].Soil and Tillage Research,2023,230:e105705.

[38] WANG B, XU G C, MA T T, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregates, organic carbon, and nitrogen in the Loess Plateau of China[J].Catena,2023, 231:e107340.

[39] 肖璐瑶,张勘,朱玉东,等.大凉螈保护空缺分析与四川栗子坪国家级自然保护区保护成效评估[J].生态学报, 2023,43(11):4502-4514.
XIAO L Y, ZHANG K, ZHU Y D, et al. Conservation gap analysis on the Taliang Knobby Newt (*Liangshantriton taliangensis*) and conservation effectiveness assessment of Sichuan Liziping National Nature Reserve[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(11):4502-4514.

[40] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
YANG J H, WANG C L, DAI H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press,2008.

[41] 钱琦,钱壮壮,葛晓敏,等.武夷山不同海拔森林土壤碳氮特征[J].森林与环境学报,2022,42(3):225-234.
QIAN Q, QIAN Z Z, GE X M, et al. Forest soil carbon and nitrogen characteristics at different altitudes in the Wuyi Mountains[J].Journal of Forest and Environment, 2022,42(3):225-234.

[42] 丁咸庆,马慧静,朱晓龙,等.大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征[J].环境科学,2015,36(10):3809-3815.
DING X Q, MA H J, ZHU X L, et al. Vertical distribution characteristics of typical forest soil organic nitrogen in Dawei mountain[J].Environmental Science,2015, 36(10):3809-3815.

[43] LI Z W, LIU C, DONG Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J].Soil and Tillage Research,2017,166:1-9.

[44] 李敏,赵熙州,丁波,等.不同间伐处理对马尾松人工林土壤特性季节动态变化的影响[J].东北林业大学学报, 2023,51(5):84-90.
LI M, ZHAO X Z, DING B, et al. Seasonal dynamic response of soil characteristic of *Pinus massoniana* plantation to different thinning treatments [J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(5):84-90.

[45] SNEH G, MISHRA M M, HOODA I S, et al. Organic matter-microbial biomass relationships in field experiments under tropical conditions: Effects of inorganic fertilization and organic amendments[J].Soil Biology and Biochemistry, 1992,24(11):1081-1084.

[46] 傅声雷,张卫信,邵元虎,等.土壤生态学:土壤食物网及其生态功能[M].北京:科学出版社,2019.
FU S G, ZHANG W X, SHAO Y H, et al. Soil ecology: Soil food web and its ecological Function [M]. Beijing: Science Press,2019.

[47] LIU G C, WANG H, YAN G Y, et al. Soil enzyme activities and microbial nutrient limitation during the secondary succession of boreal forests [J]. Catena, 2023, 230:e107268.

[48] ZHANG Y, LI C, WANG M L. Linkages of C∶N∶P stoichiometry between soil and leaf and their response to climatic factors along altitudinal gradients[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(4):1820-1829.

[49] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等.武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J].生态学报,2022,42(4):1560-1570.
YUAN X C, LIN H Y, ZENG Q X, et al. Soil organic nitrogen depolymerase activities and its influencing factors of *Pinus taiwanensis* at different altitude gradients in Wuyi Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1560-1570.

[50] 王竹,刘扬,王芳,等.黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态[J].环境科学,2023,44(11):6339-6353.
WANG Z, LIU Y, WANG F, et al. Effects of vegetation types and seasonal dynamics on the diversity and function of soil bacterial communities in the upper reaches of the Heihe River[J]. Environmental Science, 2023,44(11):6339-6353.

[51] 高海宁,李彩霞,孙小妹,等.祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):219-227.
GAO H N, LI C X, SUN X M, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J].Journal of Desert Research,2021,41(1):219-227.

[52] 李聪,吕晶花,陆梅,等.文山自然保护区典型植被土壤碳氮储量变化特征[J].生态学杂志,2021,40(11):3531-3542.
LI C, LYU J H, LU M, et al. Variation of soil carbon and nitrogen storage under typical vegetations in Wenshan Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(11):3531-3542.

(上接第 84 页)

[27] 万志纲,丁文广,蒲晓婷,等.祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析[].水土保持学报,2023,37(6):161-169.
WAN Z G, DING W G, PU X T, et al. Analysis of the spatio-temporal variation and driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):161-169.

[28] 张云昌.三峡水库蓄水 20 年回顾与展望[J].中国水利,2023(19):5-9.
ZHANG Y C. Twenty years of reservoir impoundment in the Three Gorges: A retrospective and outlook[J]. China Water Resources,2023(19):5-9.

[29] 黄意武,江优优,王广锋.新时代弘扬三峡移民精神的价值意蕴和实践路径[J].重庆社会科学,2021(9):81-90.
HAUNG Y W, JIANG Y Y, WANG G F. The rich meaning and practical path of carrying forward the spirit of the Three Gorges migrants in the new era[J]. Chongqing Social Sciences,2021(9):81-90.

[30] 喻永红.退耕还林可持续性研究:以重庆万州为例[D].杭州:浙江大学,2014.
YU Y H. Research on the viability of the Frain for Green Project: A case study of Wanzhou District in Chongqing[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.

(上接第 233 页)

[30] 陈笑晨,唐振飞,陈锡宽,等.基于 CMIP6 的福建省极端气温预估[J].干旱气象,2022,40(3):415-423.
CHEN X C, TANG Z F, CHEN X K, et al. Projection of extreme temperature in Fujian based on CMIP6 output[J].Journal of Arid Meteorology,2022,40(3):415-423.

[31] 唐振飞,杨婷,陈笑晨,等.SSPs 情景下福建省未来极端降水的模拟与预估[J].气象与环境学报,2023,39(1):26-36.
TANG Z F, YANG T, CHEN X C, et al. Simulation and prediction of future extreme precipitation in Fujian Province under SSPs scenarios[J].Journal of Meteorology and Environment,2023,39(1):26-36.

[32] 杨舒婷.三明市土地利用生态敏感性评价研究[D].福州:福建农林大学,2021.
YANG S T. Research on land use ecological sensitivity assessment in Sanming city[D].Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2021.

[33] CHEN J, CAO X, PENG S, et al. Analysis and applications of GlobeLand30: A review[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2017,6(8):e230.

[34] 杨晨辉,王艳君,苏布达,等.SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J].气候变化研究进展,2022,18(2):177-187.
YANG C H, WANG Y J, SU B D, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River Basin under SSP “Double Carbon” path[J]. Climate Change Research, 2022, 18(2):177-187.

[35] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty[J]. Climate Dynamics, 2021, 57(1):17-35.

[36] ZHANG L M, MENG X Y, WANG H, et al. Simulated runoff and sediment yield responses to land-use change using the SWAT model in Northeast China[J]. Water, 2019,11(5):e915.