

青藏高原不同类型草地土壤磷素分布及其影响因素

关鑫鑫¹, 王传宇¹, 李翠兰¹, 李金艳¹, 徐丽², 张静怡¹, 张晋京¹, 何念鹏²

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118;
2.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 磷是限制草地生态系统生产力的关键性养分元素, 阐明青藏高原草地土壤磷素分布特征及其影响因素对于维持该区域草地生态系统的可持续发展具有重要意义。沿青藏高原从西北至东南的水平样带采集不同类型草地(即草甸草原、典型草原和荒漠草原)的土壤样品, 研究土壤全磷、有效磷、无机磷组分和有机磷组分的分布特征及其影响因素。结果表明: 土壤全磷和有效磷含量以草甸草原最高, 其次为荒漠草原和典型草原。各类型草地土壤的无机磷组成均以酸溶态无机磷为主; 草甸草原土壤的有机磷组成以氢氧化钠态有机磷为主, 而典型和荒漠草原土壤则以酸溶态有机磷为主。不同类型草地相比, 草甸草原土壤的水溶态、碳酸氢钠态和氢氧化钠态无机磷以及各形态有机磷含量均显著高于典型和荒漠草原, 而荒漠草原土壤的酸溶态无机磷含量显著高于草甸和典型草原。冗余分析指出, 土壤有机碳、年均降雨量是影响全磷和有效磷的主要因子, 年均降雨量和游离氧化铁是影响无机磷组分的主要因子, 而 pH、年均气温、地上生物量和年均降雨量是影响有机磷组分的主要因子; 结构方程模型指出, 草地类型对无机磷组分和有机磷组分都有直接的影响, 年均温度和容重对无机磷组分也有直接的影响, 而海拔、年均降水量和年均气温通过草地类型对无机磷组分和有机磷组分产生间接的影响。研究结果对于青藏高寒草地生态系统磷素养分的有效管理, 进而实现该区域草地资源的可持续利用具有重要意义。

关键词: 磷素形态; 生物因子; 非生物因子; 土壤矿物; 青藏高原

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0351-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.043

Soil Phosphorus Distribution and Its Influencing Factors in Different Grassland Types on the Qinghai-Tibet Plateau

GUAN Xinxin¹, WANG Chuanyu¹, LI Cuilan¹, LI Jinyan¹,
XU Li², ZHANG Jingyi¹, ZHANG Jinjing¹, HE Nianpeng²

(1.College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Phosphorus is a key nutrient element limiting grassland ecosystem productivity. It is of great significance to clarify soil phosphorus distribution and its influencing factors for maintaining sustainable development of grassland ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau. In this study, we collected soil samples from different grassland types (i.e. meadow steppe, typical steppe, and desert steppe) along the horizontal transect of the Qinghai-Tibet Plateau from northwest to southeast. The distribution characteristics and influencing factors of soil total phosphorus, available phosphorus, and inorganic phosphorus and organic phosphorus fractions were investigated. The results showed that the total and available phosphorus contents in soil were the highest in meadow steppe, followed by desert steppe and typical steppe. The inorganic phosphorus fraction of all grassland types was dominated by acid-soluble inorganic phosphorus; the organic phosphorus fraction of meadow steppe soil was dominated by sodium hydroxide organic phosphorus, while acid-soluble organic phosphorus fraction was dominated in typical and desert steppe soils. Among different grassland

收稿日期: 2022-01-25
资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0606-2)
第一作者: 关鑫鑫(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事草地土壤研究。E-mail: 3286478936@qq.com
通信作者: 张晋京(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhangjinjing@126.com
何念鹏(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤生态研究。E-mail: henp@igsnr.ac.cn

types, the contents of water-soluble, sodium bicarbonate, sodium hydroxide inorganic phosphorus and various forms of organic phosphorus in the meadow steppe soil were significantly higher than those in the typical and desert steppes, while the content of acid-soluble inorganic phosphorus in the desert steppe soil was significantly higher than that in the typical and meadow steppes. Redundancy analysis showed that soil organic carbon, average annual rainfall were the main factors affecting the total and available phosphorus, average annual rainfall and free iron oxide were the main factors affecting inorganic phosphorus fractions, while pH, average annual temperature, above-ground biomass and average annual rainfall were the main factors affecting the organic phosphorus fractions. Structural equation model indicated that grassland type had a direct effect on both inorganic and organic phosphorus fractions, and annual average temperature and bulk density also had a direct effect on inorganic phosphorus fractions, while altitude, annual rainfall and annual average temperature had indirect effects on inorganic and organic phosphorus fractions through grassland types. The results of this study are of great significance for the effective management of soil phosphorus nutrient and the sustainable utilization of grassland resources on the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: phosphorus forms; biotic factors; abiotic factors; soil minerals; Qinghai-Tibet Plateau

磷是生命活动必需的和限制性的养分元素,对于陆地生态系统结构、过程和功能都有着重要的影响^[1-2]。作为地球上最大的陆地生态系统,草地约占全球陆地总面积的 25%,其中我国草地面积为 $3.31\times 10^6\text{ km}^2$,约占国土总面积的 41%^[2]。草地生态系统中,磷素在减缓草地退化^[3]、控制温室气体排放^[4]和调节微生物群落组成^[5]等方面起着重要作用,是维持草地生态系统生产力以及减缓全球气候变化的关键因子之一;另一方面,土壤磷素存在空间异质性并受到许多因素(如母质、气候、pH 等)的影响,明确草地土壤磷素的空间分布及其影响因素有助于揭示草地退化过程及对全球气候变化的响应机制,从而为采取合理的措施维持草地生态系统生产力提供科学依据。

青藏高原是世界上面积最大(总面积约 $2.5\times 10^6\text{ km}^2$)和海拔最高(平均海拔 4 000 m 以上)的高原,同时也是全球气候变化的敏感区域^[6]。高寒草地是该区域主要的生态系统类型,其面积占整个青藏高原面积的 50%以上^[7],因此青藏高原高寒草地生态系统磷循环的研究已经受到了广泛的关注。从青藏高原高寒草地水平样带上土壤磷素分布的研究来看,以往主要探讨了该区域不同类型草地土壤全磷和有效磷的分布特征及其影响因素^[8-10]。杨成德等^[8]研究了青藏高原东祁连山的杜鹃灌丛草地、高山柳灌丛草地、金露梅灌丛草地等 7 种类型草地土壤全磷和有效磷的分布特征;Cao 等^[9]研究了青藏高原北部高寒草甸草原和高寒草原土壤全磷和有效磷的分布特征及其影响因素。然而,目前关于青藏高原不同类型草地土壤磷素形态分布及其影响因素的研究还很少。

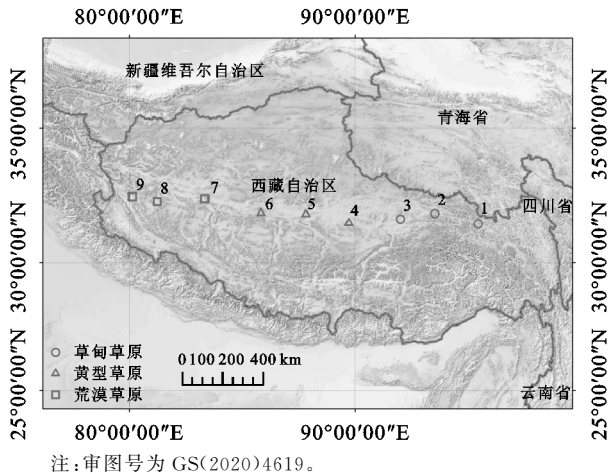
本研究沿青藏高原从西北至东南的水平样带上,采集了不同类型草地(即草甸草原、典型草原和荒漠草原)

的土壤样品,分析了土壤全磷、有效磷、无机磷组分和有机磷组分含量的分布特征及其影响因素,为青藏高寒草地生态系统磷素养分的有效管理、实现该区域草地资源的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于 2018 年 7 月沿青藏高原从西北至东南设置了 1 条水平样带,在该水平样带上选取了 9 个未经人为活动干扰的天然草地作为研究样地,其中草甸草原、典型草原和荒漠草原各 3 个样地(图 1),各样地的经纬度、海拔高度、气候因子和植被地上生物量见表 1。在每个样地内设置 4 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方,按照“S”形取样法进行土壤样品的采集,采样深度为表层 0—10 cm。



注:审图号为 GS(2020)4619。

图 1 采样点分布

1.2 测定方法

土壤容重采用环刀法,机械组成采用吸管法,pH 采用电位法,有机碳(SOC)采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法,游离氧化铁(Fe_d)和游离氧化铁(Al_d)采用连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠提取法,非晶

质氧化铁(Fe_o)和非晶质氧化铝(Al_o)采用酸性草酸 锑抗比色法,有效磷采用碳酸氢钠法,有机磷采用灼 铵溶液提取法测定,全磷采用硫酸—高氯酸消煮—钼 烧法^[12]测定。

表 1 青藏高原采样点基本信息

编号	经度 (°E)	纬度 (°N)	草原 类型	海拔/m	年均 降水量/mm	年均 气温/℃	太阳总辐射/ (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	年潜在 蒸发量/mm	干旱度	地上生物量/ (g·m ⁻²)
1	95.5	31.5	草甸草原	4104	619.9	0.41	17.8	1323	0.53	121.2
2	93.5	31.9	草甸草原	4509	536.8	−1.50	17.6	1238	0.57	112.0
3	92.0	31.6	草甸草原	4587	501.4	−4.37	18.6	1097	0.54	57.7
4	89.7	31.5	典型草原	4588	443.8	−3.06	18.8	1177	0.62	121.4
5	87.8	31.9	典型草原	4570	389.1	−2.57	19.3	1265	0.69	45.2
6	85.8	31.9	典型草原	4938	376.2	−3.77	19.3	1183	0.68	59.5
7	83.3	32.4	荒漠草原	4578	317.1	−3.90	19.0	1199	0.74	26.4
8	81.2	32.3	荒漠草原	4558	291.4	−3.49	19.4	1271	0.77	24.1
9	80.2	32.5	荒漠草原	4328	191.7	−1.27	19.9	1481	0.87	20.8

注:干旱度=1−(年均降雨量/年潜在蒸发量)^[11]。

不同形态磷组分的提取采用 Tiessen 等^[13]修正的 Hedley 磷素连续分级法,依次向土样中加入去离子水、0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH 和 1mol/L HCl 溶液,分别得到水溶态无机磷(H₂O−Pi)和有机磷(H₂O−Po)、碳酸氢钠态无机磷(NaHCO₃−Pi)和有机磷(NaHCO₃−Po)、氢氧化钠态无机磷(NaOH−Pi)和有机磷(NaOH−Po)、酸溶态无机磷(HCl−Pi)和有机磷(HCl−Po),其中 H₂O−Pi、H₂O−Po、NaHCO₃−Pi 和 NaHCO₃−Po 为活性磷,NaOH−Pi 和 NaOH−Po 为中等活性磷,HCl−Pi 和 HCl−Po 为低活性磷^[14]。

1.3 数据处理

应用 Excel 2021 软件进行数据处理,采用 SPSS 24.0 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同草地类型土壤全磷及不同形态磷含量之间的差异,最小显著差(LSD)法进行多重比较,显著性水平为 $p<0.05$;Pearson 相关性分析检验土壤全磷及不同形态磷含量与环境因子之间的线性相关关系,显

著性水平为 $p<0.05$ 和 $p<0.01$;利用 Canoco 5.0 软件对土壤全磷及不同形态磷含量与环境因子之间的关系进行冗余分析(RDA),通过前向选择(forward selection)和蒙特卡洛检验(Monte Carlo permutation test)筛选出对全磷及不同形态磷含量分布有显著贡献的环境因子,显著性水平为 $p<0.05$;利用 IBM SPSS Amos 23.0 软件构建土壤磷组分与环境因子的结构方程模型(SEM),用来评价对磷组分有直接和间接影响的环境因子。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质

由表 2 可知,不同类型草地土壤中,草甸草原土壤的砂粒含量低于典型和荒漠草原,而粉粒和黏粒含量则低于典型和荒漠草原,但 3 种类型草地土壤之间的差异不显著;另一方面,草甸草原土壤的容重和 pH 显著低于典型和荒漠草原,而 SOC、Fe_d、Al_d 和 Fe_o 含量显著高于典型和荒漠草原,但 3 种类型草地土壤的 Al_o 含量差异不显著。

表 2 青藏高原不同类型草地土壤的基本性质

草地类型	容重/ (g·cm ⁻³)	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	pH	SOC/ (g·kg ⁻¹)	Fe _d / (g·kg ⁻¹)	Al _d / (g·kg ⁻¹)	Fe _o / (g·kg ⁻¹)	Al _o / (g·kg ⁻¹)
草甸草原	1.18±0.11b	49.0±16.4a	41.3±12.7a	9.76±3.74a	6.92±0.29b	51.0±1.60a	7.21±2.12a	4.35±1.87a	6.61±3.63a	1.47±0.91a
典型草原	1.51±0.06a	65.5±15.1a	25.8±12.3a	8.70±3.10a	8.20±0.16a	8.50±2.45b	2.02±1.07b	0.46±0.46b	1.89±0.17b	0.82±0.62a
荒漠草原	1.52±0.20a	70.8±13.5a	20.2±8.95a	9.03±4.57a	8.23±0.18a	4.12±2.17c	2.59±0.80b	0.56±0.68b	1.93±0.36b	0.70±0.58a

注:SOC 为土壤有机碳;Fe_d 为游离氧化铁;Fe_o 为非晶质氧化铁;Al_d 为游离氧化铝;Al_o 为非晶质氧化铝;表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤全磷、有效磷和有机磷含量

由表 3 可知,青藏高原采样点土壤全磷含量在 0.33~0.71 g/kg,其中有机磷占到了全磷的 64.6%~85.9%。不同类型草原相比,土壤全磷、有效磷和有机磷含量均以草甸草原最高,其次为荒漠草原,而典型草原最低,

其中草甸草原和荒漠草原的土壤全磷含量显著高于典型草原,但草甸草原和荒漠草原之间差异不显著;草甸草原的土壤有效磷含量显著高于典型草原和荒漠草原,但典型草原和荒漠草原之间差异不显著;草甸草原的土壤有机磷含量显著高于典型草原,但草甸草原和

荒漠草原以及典型草原和荒漠草原之间差异不显著。来看,草甸草原土壤的 PAC 值显著高于典型草原和从土壤磷活化系数(PAC,即有效磷占全磷的百分数) 荒漠草原,但典型草原和荒漠草原之间差异不显著。

表 3 青藏高原不同类型草地土壤全磷、有效磷和有机磷含量及磷活化系数

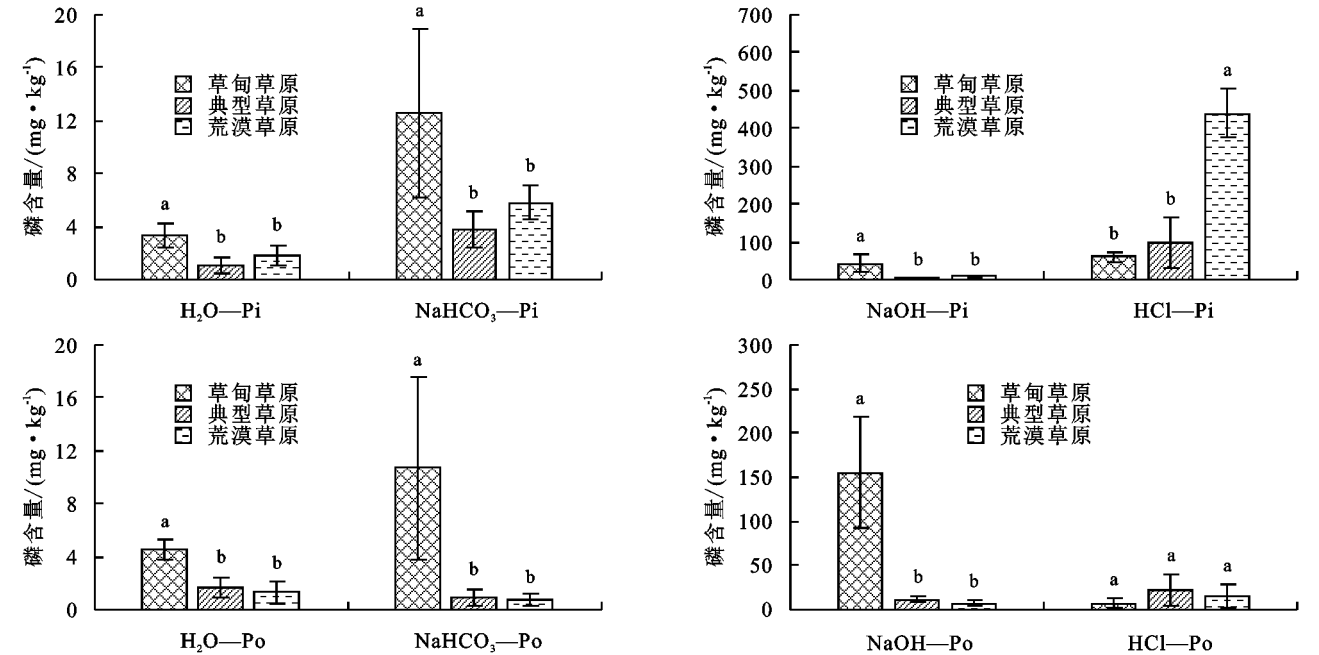
草地类型	全磷/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (g · kg ⁻¹)	有机磷/ (g · kg ⁻¹)	磷活化 系数/%
草甸草原	0.71±0.18a	6.18±2.58a	0.61±0.20a	0.86±0.21a
典型草原	0.33±0.09b	1.92±0.72b	0.23±0.06b	0.59±0.17b
荒漠草原	0.65±0.13a	2.91±0.57b	0.42±0.10ab	0.46±0.10b

2.3 土壤不同形态磷组分含量

由图 2 可知,土壤无机磷组分中,HCl-Pi 的含量最高(占无机磷总量的 50.2%~96.4%),其次为 NaOH-Pi 和 NaHCO₃-Pi(分别占无机磷总量的 1.9%~36.3%和 1.3%~10.7%),而 H₂O-Pi 的含量最低(占无机磷总量的 0.4%~2.8%)。不同类型草原相比,草甸草原土壤的 H₂O-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaOH-Pi 含量显著高于典型草原和荒漠草原,但典型草原和荒漠草原之间没有显著差异;与 H₂O-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaOH-Pi 不同,荒漠草原土壤的 HCl-Pi 含量显著高于草甸草原和典型草原,但草甸草原和典型草原之间差异不显著。

土壤有机磷组分中,草甸草原土壤的 NaOH-Po

含量最高(占有机磷总量的 87.5%),其次为 NaHCO₃-Po 和 HCl-Po(分别占有机磷总量的6.0%和 4.0%),而 H₂O-Po 的含量最低(占有机磷总量的 2.56%);典型草原和荒漠草原土壤的 HCl-Po 含量最高(占有机磷总量的 60.5%~61.8%),其次为 NaOH-Po 和 H₂O-Po(分别占有机磷总量的 30.1%~32.3%和 4.6%~5.3%),而 NaHCO₃-Po 含量最低(占有机磷总量的 2.7%~3.0%)。不同类型草原相比,草甸草原土壤的 H₂O-Po、NaHCO₃-Po、NaOH-Po 含量显著高于典型草原和荒漠草原,但典型草原和荒漠草原之间没有显著差异;与 H₂O-Po、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 不同,3 种草地类型土壤之间 HCl-Po 含量差异不显著。



注:图柱上方不同小写字母表示不同类型草原间差异显著($p<0.05$)。

图 2 青藏高原不同类型草地土壤各形态磷素组分的含量

2.4 土壤全磷、有效磷和磷组分与环境因子的关系

2.4.1 相关分析 由表 4 可知,全磷含量与各环境因子之间没有显著相关性;有效磷含量与 Fe_d、Al_d、Fe_o 和 SOC 显著正相关,而与 pH 和容重显著负相关。土壤无机磷组分中,H₂O-Pi 含量与 pH 显著负相关;NaHCO₃-Pi 和 NaOH-Pi 含量与 Fe_o、Fe_d、Al_d 和 SOC 显著正相关,而与 pH 和容重显著负相关;HCl-Pi 含量与太阳总辐

射显著正相关,而与地上生物量和年均降雨量显著负相关。土壤有机磷组分中,H₂O-Po、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 含量与年均降雨量、地上生物量、粉粒、Fe_d、Al_d、Fe_o 和 SOC 显著正相关,而与太阳总辐射、pH 和容重显著负相关;此外 H₂O-Po 含量还与砂粒呈显著负相关关系,但 HCl-Po 含量与所有环境因子之间都无显著相关性。

表 4 土壤全磷、有效磷和磷组分含量与环境因子的相关系数

指标	全磷	有效磷	无机磷组分				有机磷组分			
			H ₂ O-Pi	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	HCl-Pi	H ₂ O-Po	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Po	HCl-Po
Elevation	-0.45	-0.31	-0.50	-0.33	-0.51	-0.18	-0.17	-0.20	-0.28	0.33
MAP	0.06	0.54	0.31	0.56	0.59	-0.87 * *	0.78 *	0.83 * *	0.88 * *	-0.36
MAT	0.25	0.31	0.27	0.30	0.47	-0.18	0.33	0.27	0.38	-0.15
TR	-0.16	-0.54	-0.27	-0.58	-0.57	0.74 *	-0.70 *	-0.80 * *	-0.81 * *	0.44
AGB	0.13	0.56	0.34	0.59	0.59	-0.81 * *	0.71 *	0.79 *	0.82 * *	-0.36
pH	-0.57	-0.82 * *	-0.77 *	-0.90 * *	-0.90 * *	0.58	-0.88 * *	-0.97 * *	-0.97 * *	0.57
BD	-0.52	-0.74 *	-0.55	-0.79 *	-0.78 *	0.48	-0.79 *	-0.87 * *	-0.85 * *	0.61
Sand	-0.31	-0.66	-0.05	-0.49	-0.60	0.41	-0.69 *	-0.60	-0.64	0.36
Silt	0.33	0.70 *	0.13	0.56	0.65	-0.49	0.75 *	0.68 *	0.72 *	-0.33
Clay	0.18	0.31	-0.32	0.12	0.28	-0.01	0.30	0.16	0.21	-0.37
Fe _d	0.55	0.91 * *	0.44	0.73 *	0.83 * *	-0.33	0.87 * *	0.80 * *	0.80 * *	-0.63
Al _d	0.63	0.86 * *	0.43	0.80 * *	0.85 * *	-0.40	0.85 * *	0.82 * *	0.83 * *	-0.38
Fe _o	0.48	0.79 *	0.46	0.72 *	0.85 * *	-0.50	0.85 * *	0.81 * *	0.88 * *	-0.44
Al _o	0.46	0.49	0.49	0.66	0.61	-0.38	0.50	0.66	0.63	-0.59
SOC	0.45	0.81 * *	0.65	0.81 * *	0.85 * *	-0.65	0.95 * *	0.96 * *	0.98 * *	-0.52

注: Elevation 为海拔; MAP 为年均降雨量; MAT 为年均气温; TR 为太阳总辐射; AGB 为地上生物量; BD 为容重; Sand 为砂粒; Silt 为粉粒; Clay 为黏粒; * 表示在 0.05 水平上呈显著相关; * * 表示在 0.01 水平上呈显著相关。下同。

由表 5 可知,土壤全磷与有效磷、H₂O-Po、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 之间呈显著的正相关;除 HCl-Pi 和 HCl-Po 外,有效磷与其他无机磷和有机磷组分均呈显著正相关,其中有效磷与 NaHCO₃-Pi 的相关系数(0.98)最高。从不同形态的无机磷和有机磷组分来看,H₂O-Pi、H₂O-Po、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po、NaOH-Pi 和 NaOH-Po 之间通常都呈显著的正相关,而 HCl-Pi 仅与 NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 呈显著的负相关,HCl-Po 与其他磷组分之间都没有显著的相关性。

表 5 土壤不同形态磷组分的相关系数

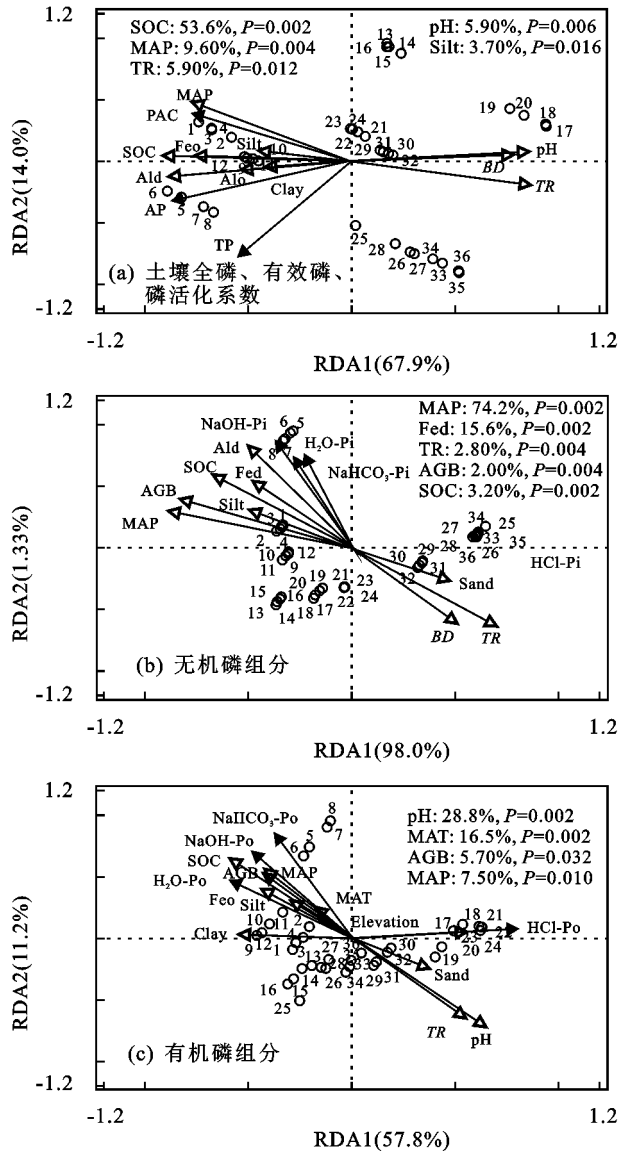
指标	全磷	有效磷	H ₂ O-Pi	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	HCl-Pi	H ₂ O-Po	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Po	HCl-Po
全磷	1.00	0.81 * *	0.43	0.50	0.46	-0.34	0.69 *	0.81 * *	0.82 * *	0.27
有效磷		1.00	0.79 *	0.98 * *	0.96 * *	-0.35	0.78 *	0.91 * *	0.89 * *	-0.43
H ₂ O-Pi			1.00	0.86 * *	0.78 *	-0.24	0.54	0.74 *	0.69 *	-0.42
NaHCO ₃ -Pi				1.00	0.94 * *	-0.33	0.73 *	0.90 * *	0.86 * *	-0.42
NaOH-Pi					1.00	-0.25	0.82 * *	0.86 * *	0.87 * *	-0.58
HCl-Pi						1.00	-0.56	-0.67 *	-0.69 *	0.14
H ₂ O-Po							1.00	0.88 * *	0.91 * *	-0.64
NaHCO ₃ -Po								1.00	0.99 * *	-0.52
NaOH-Po									1.00	-0.53
HCl-Po										1.00

由表 6 可知,年均降雨量与地上生物量、粉粒、Fe_d、Al_d 和 Fe_o 之间呈显著的正相关,而与 pH、容重和砂粒之间呈显著的负相关;相反,太阳总辐射与 pH、容重和砂粒之间呈显著的正相关,而与地上生物量、粉粒、Al_d、Fe_o 和 Al_o 之间呈显著的负相关;此外,地上生物量与粉粒、Al_d 和 Fe_o 之间呈显著的正相关,而与 pH 和砂粒之间呈显著的负相关。不同的土壤性质之间,pH 与容重以及粉粒与黏粒、Fe_d、Al_d、Fe_o 之间都呈显著的正相关,而容重、砂粒与 Fe_d、Al_d、Fe_o 之间则呈显著的负相关。

2.4.2 冗余分析 从土壤全磷、有效磷和磷活化系数与环境因子的冗余分析结果(图 3a)可以看到,第 1 和第 2 排序轴累计解释了土壤全磷、有效磷、磷活化系数与环境因子关系的 81.9%。各种环境因子中,SOC、年均降雨量、太阳总辐射、pH 和粉粒对全磷、有效磷、磷活化系数的影响达到了显著性水平($p < 0.05$),它们对全磷、有效磷和磷活化系数变异的解释量分别为 53.6%,9.60%,5.90%,5.90%,3.70%。

表 6 土壤性质与环境因子的相关系数

指标	Elevation	MAP	MAT	TR	AGB	pH	BD	Sand	Silt	Clay	Fe _d	Al _d	Fe _o	Al _o
Elevation	1.00	-0.06	-0.72 *	-0.09	-0.03	0.34	0.06	-0.01	-0.01	0.06	-0.18	-0.12	-0.44	-0.13
MAP		1.00	0.35	-0.91 * *	0.90 * *	-0.78 *	-0.73 *	-0.73 *	0.79 *	0.35	0.68 *	0.73 *	0.82 * *	0.52
MAT			1.00	-0.09	0.48	-0.34	0.01	-0.40	0.42	0.23	0.28	0.30	0.66	0.16
TR				1.00	-0.82 * *	0.76 *	0.88 * *	0.73 *	-0.75 *	-0.49	-0.66	-0.76 *	-0.68 *	-0.73 *
AGB					1.00	-0.71 *	-0.61	-0.79 *	0.83 * *	0.45	0.66	0.69 *	0.77 *	0.62
pH						1.00	0.89 * *	0.54	-0.61	-0.14	-0.75 *	-0.83 * *	-0.83 * *	-0.70 *
BD							1.00	0.59	-0.62	-0.35	-0.74 *	-0.84 * *	-0.67 *	-0.78 *
Sand								1.00	-0.99 * *	-0.82 * *	-0.82 * *	-0.83 * *	-0.81 * *	-0.45
Silt									1.00	0.74 *	0.85 * *	0.87 * *	0.85 * *	0.44
Clay										1.00	0.54	0.52	0.45	0.40
Fe _d											1.00	0.85 * *	0.83 * *	0.43
Al _d												1.00	0.87 * *	0.58
Fe _o													1.00	0.46
Al _o														1.00



注:TP 为全磷;AP 为有效磷;PAC 为磷活化系数;1~12 表示草甸草原,13~24 表示典型草原,25~36 表示荒漠草原。

图 3 土壤全磷、有效磷、磷活化系数、无机磷组分和有机磷组分与环境因子的冗余分析(RDA)

从土壤无机磷组分与环境因子的冗余分析结果(图 3b)可以看到,第 1 和第 2 排序轴累计解释了土壤无机磷组分与环境因子关系的 99.3%。各种环境因子中,年均降雨量、Fe_d、太阳总辐射、地上生物量和 SOC 对无机磷组分的影响达到了显著性水平($p < 0.05$),对无机磷组分变异的解释量分别为 74.2%,15.6%,2.80%,2.00%,3.20%。

从土壤有机磷组分与环境因子的冗余分析结果(图 3c)可以看到,第 1 和第 2 排序轴累计解释了有机磷组分与环境因子关系的 69.0%。各种环境因子中,pH、年均气温、地上生物量和年均降雨量对有机磷组分的影响达到了显著性水平($p < 0.05$),对有机磷组分变异的解释量分别为 28.2%,16.5%,5.70%,7.50%。

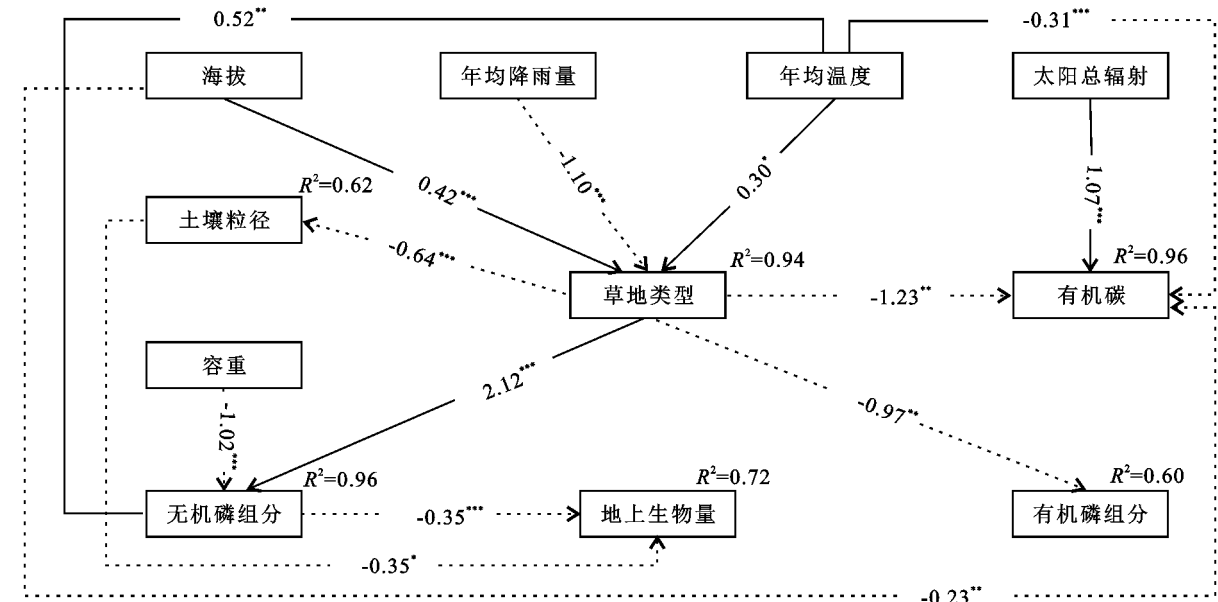
2.4.3 结构方程模型 构建的结构方程模型(图 4)具有良好的适配度(即卡方值/自由度=2.01,适配优度指数=0.95,比较适配指数=0.99,近似误差均方根=0.02, $p = 0.06$),该模型对无机磷组分和有机磷组分的解释率分别为 96.0%和 60.0%。从土壤磷组分与环境因子的关系来看,草地类型对无机磷组分和有机磷组分都有直接的影响,年均温度和容重对无机磷组分也有直接的影响,而海拔、年均降雨量和年均温度通过草地类型对无机磷组分和有机磷组分产生间接的影响。此外,分析路径还表明,土壤粒径和无机磷组分对地上生物量也会产生直接的影响。

3 讨论

以往对于内蒙古草地样带的研究^[1]表明,草甸草原、典型草原和荒漠草原土壤的平均全磷含量分别为 0.20,0.24,0.21 g/kg,这些数值均低于本研究结果(表 3),其原因可能是由于内蒙古草地区域的年平均

气温(−0.77~5.58 °C)^[1] 高于青藏草原区域的年平均气温(−4.37~0.41 °C)(表 1),强烈的岩石风化作用导致内蒙古草地土壤具有较低的全磷含量。Rui 等^[15]通过野外模拟增温试验的研究也指出,气候变暖导致青藏高寒草甸土壤的全磷含量下降,这进一步证实了本研究中上述推断。不同类型草地之间,典型草原土壤的全磷含量显著低于草甸和荒漠草原土壤(表 3),这与 Feng 等^[11]揭示的规律性一致,即我国

北方草地样带土壤全磷含量随干旱程度增加呈现先下降后升高的变化趋势,本研究中典型草原分布区的干旱程度低于草甸草原而高于荒漠草原(表 1),导致典型草原土壤的全磷含量低于其他 2 个区域的草原土壤。从相关分析结果来看,土壤全磷含量与环境因子之间都没有显著的相关性(表 4),但与活性和中等活性有机磷呈显著的正相关(表 5),这说明环境因子主要是通过影响活性有机磷分布进而影响全磷分布。



注:实线表示正影响,虚线表示负影响,线上数值为路径系数;*表示在 0.05 水平上显著;**表示在 0.01 水平上显著;***表示在 0.001 水平上显著($n=36$)。

图 4 土壤磷组分与环境因子的结构方程模型

与本研究结果(表 2)相比,内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原土壤的平均有效磷含量(分别为 16.3, 9.1, 5.2 mg/kg)^[1] 较高,说明温度升高有利于提高土壤磷素的有效性,以往野外模拟增温试验的研究^[16]也证实了本研究的观点。土壤磷活化系数(即 PCA)是表征磷素转化及有效性的重要指标, $PAC \leq 2.0\%$ 意味着全磷不容易向有效磷转化^[17]。本研究中,青藏高原草地土壤的 PAC 值仅为 0.46%~0.86%,说明土壤有效磷的供应潜力很低,这可能也是限制该区域草地生产力的关键因子。相关分析指出,pH、容重、粉粒、SOC、 Fe_d 、 Al_d 和 Fe_o 是影响有效磷含量的主要因素(表 4)。已有研究^[18]也发现,土壤有效磷与 pH 负相关而与 SOC 含量正相关,这与本研究的结果相一致。通常认为,pH 降低能促进原生矿物分解^[19],同时也能促进低活性磷向活性磷的转化^[18],这些对于提高磷素有效性都是有利的;有机质能够通过铁铝氧化物表面形成包膜^[20]、改变铁铝氧化物表面电荷以及带负电荷的磷酸盐竞争吸附点位^[21]等机制,提高磷素有效性;就土壤矿物而言,铁、铝氧化物与磷素形成的铁、铝结合态磷是有效磷的主要来

源之一^[20],铁、铝氧化物含量越高意味着有效磷的供应潜力越大。不同类型草原相比,草甸草原土壤的 pH 和容重低于典型和荒漠草原,而 SOC、 Fe_d 、 Al_d 和 Fe_o 则高于典型和荒漠草原(表 2),这能够解释草甸草原土壤磷素有效性较高的原因。另外,传统的观点认为 pH 为 6.5~7.0 时磷的植物有效性最高^[22],而草甸草原土壤的 pH(表 2)符合该条件,因此磷素有效性高于典型和荒漠草原。

本研究表明,供试土壤中无机磷组分以低活性的 HCl-Pi 为主(图 2),同时本研究发现,该形态磷素含量主要受到年均降雨量、太阳总辐射和地上生物量的影响(表 4)。Feng 等^[11]对于我国北方草地样带土壤的研究也发现,HCl-Pi 含量随干旱程度的增加而增加,这与本研究结果相一致。一般认为,HCl-Pi 是原生矿物中与 Ca 结合的低活性磷^[14],在降雨量较高和植被生物量较大的草甸和典型草原区域,强烈的风化作用使得 Ca 易于被淋失掉,同时植被为满足自身生长以及根系分泌有机酸增多会使得一部分低活性的 HCl-Pi 向更活性的 H_2O-Pi 、 $NaHCO_3-Pi$ 和 $NaOH-Pi$ 转化,本研究中 HCl-Pi 与 AGB 负相

关而 $\text{H}_2\text{O}-\text{Pi}$ 、 NaHCO_3-Pi 、 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 与 pH 负相关也支持本研究上述的观点(表 4);相反,在降雨量较低和植被生物量较小的荒漠草原区域,原生矿物风化程度较低,植被对有效磷的需求量较少,植被根系分泌有机酸较少,碳酸钙容易积累在土壤中,这些都导致 $\text{HCl}-\text{Pi}$ 含量高于草甸和典型草原。另外,已有研究^[23]发现,太阳辐射增强会显著减少植株各器官中磷的含量,这可能也是太阳总辐射较强的荒漠草原土壤中低活性 $\text{HCl}-\text{Pi}$ 含量较高的原因之一。从相关分析结果(表 4)来看, NaHCO_3-Pi 、 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 与容重、 Al_d 、 Fe_d 、 Fe_o 、SOC 之间呈显著的相关性,这与有效磷的分析结果是一致的;然而, $\text{H}_2\text{O}-\text{Pi}$ 与上述土壤性质之间则没有显著的相关性,这可能与供试土壤中该形态磷的含量和比例较低有关。

本研究中,供试土壤有机磷占到了全磷的 60% 以上(表 3),该数值与内蒙古不同类型草原表层土壤有机磷占全磷的平均比例(61%)^[1]相一致,这说明青藏草地土壤有机磷转化较慢,是限制该区域土壤磷循环的主要过程^[1]。从土壤有机磷组分与环境因子之间的关系来看,年均降雨量、太阳总辐射、地上生物量、pH、容重、粉粒、SOC 和游离(非晶质)铁铝氧化物是影响活性和中等活性有机磷含量的主要因素(表 4),其中又以年均降雨量、地上生物量和 pH 的影响最为关键(图 3)。考虑到气候因子是控制植物生长、磷素需要、生物活动、有机质分解和矿物演化等过程的主要驱动因子^[24],本研究可以假设气候因子(MAP、TR)是通过影响其他环境因子(Al_d 、地上生物量、砂粒、pH)间接地影响土壤有机磷的含量和组成,对此还需要在今后的研究中进行验证。在上述影响土壤有机磷分布的环境因子中,土壤铁铝氧化物可以通过络合反应、氢键作用或表面沉淀反应与有机磷化合物发生相互作用,使得有机磷被吸附在矿物表面^[25],因此铁铝氧化物含量越高被土壤保持的有机磷也就越多;从本研究(表 4)来看,被铁铝氧化物保持的主要是活性和中等活性的有机磷组分,同时无定形氧化铝对于有机磷保持的作用不如其他类型的铁铝氧化物。对于地上植被,它能够通过影响磷输入进而影响土壤有机磷含量,植物根系首先从土壤中吸收有效态磷并将其转移到地上器官中,待植物体死亡后以凋落物形式将合成的有机磷归还到土壤中^[26],以凋落物形式输入的有机磷越多则土壤有机磷含量也越高。就土壤 pH 而言,通常认为它可以通过几种机制影响土壤有机磷的含量和组成:(1)pH 影响铁铝氧化物的活性,低 pH 条件下铁铝氧化物活性增强,能够吸附更多的有机磷^[24];(2)pH 影

响微生物和胞外磷酸酶活性,低 pH 条件抑制微生物和胞外磷酸酶活性^[27],从而导致有机磷的积累;(3)pH 影响植物和微生物群落的组成^[28],这可能改变进入土壤的有机磷形态以及磷酸酶活性的大小,然而目前对于该机制的认识还十分有限。不同类型草原之间,草甸草原的地上生物量高于典型和荒漠草原(表 1),前者通过凋落物形式进入土壤中的有机磷较多;同时,草甸草原土壤中铁铝氧化物含量较高、pH 较低(中性范围内)(表 2),因此草甸草原土壤中活性和中等活性有机磷的含量显著高于其他 2 种类型的草原土壤。

4 结论

(1)青藏高原草地土壤全磷含量范围在 0.33~0.71 g/kg,其中有机磷占全磷的 64.6%~85.9%,而有效磷仅占全磷的 0.46%~0.86%;各类型草地土壤的无机磷组分均以 $\text{HCl}-\text{Pi}$ 为主,草甸草原土壤的有机磷组分以 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 为主,而典型和荒漠草原土壤则以 $\text{HCl}-\text{Po}$ 为主。

(2)不同类型草地相比,草甸草原土壤的全磷、有效磷、 $\text{H}_2\text{O}-\text{Pi}$ 、 NaHCO_3-Pi 、 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 以及各形态有机磷的含量均高于典型和荒漠草原,而荒漠草原土壤的 $\text{HCl}-\text{Pi}$ 含量显著高于草甸和典型草原,即草甸草原土壤磷素具有更高的有效性。

(3)土壤有机碳、年均降雨量是影响全磷和有效磷的主要因子,年均降雨量和 Fe_d 是影响无机磷组分的主要因子,而 pH、年均气温、AGB 和年均降雨量是影响有机磷组分的主要因子;草地类型对无机磷组分和有机磷组分都有直接的影响,年均温度和容重对无机磷组分也有直接的影响,而海拔、年均降雨量和年均温度通过草地类型对无机磷组分和有机磷组分产生间接的影响。

参考文献:

- [1] Zhu X Y, Zhao X R, Lin Q M, et al. Distribution characteristics of soil organic phosphorus fractions in the Inner Mongolia Steppe[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(4): 2394-2405.
- [2] 吴金凤,刘鞠善,李梓萌,等.草地土壤磷循环及其对全球变化的响应[J].中国草地学报,2021,43(6):102-111.
- [3] Liu C C, Liu Y G, Guo K, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium addition on the productivity of a karst grassland: Plant functional group and community perspectives[J]. Ecological Engineering, 2018, 117: 84-95.
- [4] 黄玫,王娜,王昭生,等.磷影响陆地生态系统碳循环过程及模型表达方法[J].植物生态学报,2019,43(6):471-481.

- [5] Graça J, Daly K, Bondi G, et al. Drainage class and soil phosphorus availability shape microbial communities in Irish grasslands[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 104: e103297.
- [6] Cao Z Y, Wang Y, Li J, et al. Soil organic carbon contents, aggregate stability, and humic acid composition in different alpine grasslands in Qinghai Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(11): 2015-2027.
- [7] Tang L, Dong S K, Liu S L, et al. The relationship between soil physical properties and alpine plant diversity on Qinghai Tibet Plateau[J]. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2015, 4(2): 88-93.
- [8] 杨成德, 陈秀蓉, 龙瑞军, 等. 东祁连山高寒草地返青期不同草地型土壤磷的分布特征[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(3): 47-54.
- [9] Cao Y Z, Wang X D, Lu X Y, et al. Soil organic carbon and nutrients along an alpine grassland transect across Northern Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(4): 564-573.
- [10] Lu X Y, Yan Y, Sun J, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus storage in alpine grassland ecosystems of Tibet: Effects of grazing exclusion[J]. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(19): 4492-4504.
- [11] Feng J, Turner B L, Lü X T, et al. Phosphorus transformations along a large-scale climosequence in arid and semiarid grasslands of northern China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(9): 1264-1275.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction. In: Carter M R, Gregorich E G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*[M]. Second Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.
- [14] Hou E Q, Tan X, Heenan M, et al. A global dataset of plant available and unavailable phosphorus in natural soils derived by Hedley method[J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 1-13.
- [15] Rui Y C, Wang Y F, Chen C R, et al. Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1): 73-87.
- [16] Zi H B, Hu L, Wang C T, et al. Responses of soil bacterial community and enzyme activity to experimental warming of an alpine meadow[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 429-438.
- [17] Lu X C, Mahdi Al-K, Han X Z, et al. Longterm application of fertilizer and manures affect P fractions in Mollisol[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): e14793.
- [18] Li C L, Zhang P, Zhang J J, et al. Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(9): 1256-1271.
- [19] Zhou J, Wu Y H, Prietzel J, et al. Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China)[J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 251-259.
- [20] 陈晶, 张毅敏, 杨飞, 等. 基于核磁共振技术的太湖沉积物有机磷垂直分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(9): 850-856.
- [21] Fink J R, Inda A V, Tiecher T, et al. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability[J]. *Ciência Agrotecnologia*, 2016, 40: 369-379.
- [22] Penn C J, Camberato J J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants[J]. *Agriculture*, 2019, 9(6): e120.
- [23] 郑有飞, 李萍, 吴芳芳, 等. 太阳辐射减弱和 O₃ 增加对冬小麦植株磷含量、分配和转运的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(3): 402-411.
- [24] Hou E Q, Wen D Z, Kuang Y W, et al. Soil pH predominantly controls the forms of organic phosphorus in topsoils under natural broadleaved forests along a 2 500 km latitudinal gradient[J]. *Geoderma*, 2018, 315: 65-74.
- [25] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 等. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1290-1299.
- [26] Borie F, Aguilera P, Castillo C, et al. Revisiting the nature of phosphorus pools in Chilean volcanic soils as a basis for arbuscular mycorrhizal management in plant P acquisition[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(2): 390-401.
- [27] Xu X F, Schimel J P, Janssens I A, et al. Global pattern and controls of soil microbial metabolic quotient[J]. *Ecological Monographs*, 2017, 87(3): 429-441.
- [28] Dubuis A, Giovanettina S, Pellissier L, et al. Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(4): 593-606.