

黄土塬区土壤碳氮磷化学计量特征对 果园还耕的响应及影响因素

刘入华¹, 马雅莉^{2,3}, 崔二亮¹, 乔江波³, 贾小旭⁴, 朱元骏³, 邵明安⁴

(1. 西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省林业科学院, 西安 710016; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: [目的] 黄土高原是我国最大的苹果优势产区。近年来, 由于苹果树老龄化严重、品种结构单一及粮食市场不稳定等因素, 为保障国家粮食安全, 黄土高原的老龄化果园改种玉米等粮食作物已成为普遍现象。为研究土壤生态化学计量特征对果园还耕的响应及影响因素。[方法] 选取黄土塬区还耕0 a(30 a左右果园)、1 a、3 a和5 a的农田为研究对象, 同时选取种植粮食作物的农田(CK)作为对照。测定0~100 cm土层(每10 cm为1层, 共10层)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)质量分数, 并计算其生态化学计量特征, 同时分析其影响因素。[结果] 1) 随着还耕年限的增加, 果园还耕后0~100 cm土层土壤中的SOC和TN平均值呈先下降再上升的趋势, 但土壤中的TP平均值一直处于降低趋势, 且均高于CK; 土壤中的C:N无明显变化规律, 但C:P和N:P逐渐增加, 且还耕5 a后农田的C:P和N:P平均值均超过CK。2) 随着土层深度的增加, 不同还耕年限农田土壤中的SOC、TN和TP整体均呈下降趋势, C:P、N:P整体呈先增大后减小趋势, 而C:N无明显变化规律。3) 研究区中土壤颗粒组成是影响土壤SOC、TN和TP及生态化学计量特征的主要因素。[结论] 研究结果揭示了不同林龄果园在还耕后土壤C、N、P的变化规律, 可为黄土塬区生态环境保护和可持续发展提供重要参考。

关键词: 黄土塬区; 果园还耕; 化学计量特征; 土壤养分; 土壤颗粒组成

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0289-09

Response Characteristics and Influencing Factors of the Ecological Stoichiometry of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus to Conversion of Orchards into Farmlands on the Loess Tableland Area

LIU Ruhua¹, MA Yali^{2,3}, CUI Erliang¹, QIAO Jiangbo³, JIA Xiaoxu⁴, ZHU Yuanjun³, SHAO Mingan⁴

(1. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an, 710016, China; 3. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The Loess Plateau is the largest apple-producing area in China. Due to serious aging of apple trees in recent years, the single variety structure, and the instability of China's grain market, it has become a common phenomenon for orchards to be transformed into farmlands on the Loess Plateau to ensure national food security. In order to study the response characteristics of the ecological stoichiometric ratios to conversion of orchards into farmlands. [Methods] Farmlands of 0 year (30 years orchard), 1 year, 3 years and 5 years old was selected as the research objects in this study, with farmlands cultivated with food crops set as the control group (CK). Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents in the soil of 0—100 cm depth

收稿日期: 2024-09-25

修回日期: 2024-11-01

录用日期: 2024-11-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42307412, 42377316); 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放基金项目(2022KFKTC019)

第一作者: 刘入华(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤质量研究。E-mail: 15630857183@163.com

通信作者: 崔二亮(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事物理学研究。E-mail: erliang.cui@nwfau.edu.cn

乔江波(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤水环境研究。E-mail: jiangboqiao815@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

(10 cm per layer, a total of 10 layers.) were measured, and their ecological stoichiometric ratios were calculated, and the influencing factors of the ecological stoichiometric ratios were analyzed. [Results] 1) With the increase of conversion years, the mean values of SOC and TN in 0—100 cm soil after orchards returning showed a trend of decreasing first and then increasing, and were higher than that in CK, but the mean value of TP in soil showed a decreasing trend. There was no significant change in C:N in soil, but C:P and N:P increased gradually, while the mean values of C:P and N:P in farmlands after 5 years of tillage were higher than that in CK. 2) With the increase of soil depth, SOC, TN and TP in the soil of orchards with different returning years showed a downward trend as a whole. The C:P and N:P generally increased first and then decreased, while C:N showed no obvious change pattern. 3) The soil particle composition was the main factor affecting soil nutrients and ecological stoichiometric ratios in the study area. [Conclusion] These results revealed the changed pattern of C, N and P in the soil of orchards of different ages after conversion into farmlands. The results will provide an important reference for ecological environment protection and sustainable development in the loess tableland area.

Keywords: loess tableland area; converting orchards into farmland; ecological stoichiometry; soil nutrient; soil particle composition

Received: 2024-09-25

Revised: 2024-11-01

Accepted: 2024-11-10

Online(www.cnki.net): 2025-01-20

生态化学计量学是研究多种化学物质在生态过程和生态因素相互作用中平衡的科学,主要研究碳(C)、氮(N)和磷(P)元素的计量关系,以及它们对生态系统功能和生态过程的影响^[1]。土壤是植物赖以生存与修复的重要物质基础,土壤中的C、N和P是生态系统中关键的养分元素,它们参与植物的生长、微生物的代谢、能量转化等重要生态过程^[2]。土壤中的C:N可以评估土壤中有机质的矿化速度,C:P可以反映土壤中磷的有效性,N:P可以反映土壤养分供应水平^[3]。通过研究土壤C、N和P的质量分数、比率和循环过程,可以更好地理解生态系统内养分的循环途径,维持生态系统的养分平衡和稳定性。因此,研究土壤生态化学计量特征的变化对理解土壤生态系统的养分循环十分重要^[4]。

黄土高原地区是典型的生态环境脆弱区,也是我国主要的水土流失地区之一^[5]。水土流失导致土壤中的C、N和P元素大量流失,使该地区土壤生产力大幅下降^[6]。为防止水土流失^[7],国家于1999年在该地区实施退耕还林(草)工程,使大量的坡耕地转化为林地和草地,然而植被恢复的过程显著影响黄土高原土壤生态化学计量特征的变化。因此,目前针对黄土高原植被恢复下土壤生态化学计量的变化特征进行大量的研究^[8-11]。如胡亚伟等^[8]以晋西黄土区典型人工混交林地、刺槐纯林地、经济林地、农田和荒草地为研究对象,比较4种土地利用方式的土壤理化性质发现,林地的全碳(TC)、全氮(TN)、C:P和N:P显著高于农田,最高的是人工混交林地;沙国良等^[9]以黄土高原丘陵区油松、山杏、山杏油松杂交林、沙棘林等典

型的退耕还林树种为研究对象,并以天然草地作对照,研究该地区的土壤有机碳(SOC)储量的变化特征发现,退耕还林后,该地区的SOC储量显著增加;海旭莹等^[10]研究发现,黄土高原废弃农田随弃耕还草恢复年限的增加,土壤C、N和P质量分数及N:P总体上呈增加趋势,C:N呈降低趋势,表明草地恢复对该地生态具有重要影响;高德新等^[11]以黄土高原3种典型恢复植被(乔木、灌木、草地)和坡耕地为研究对象,研究土壤C、N和P质量分数的区别发现,在植被恢复后土壤的C、N和P明显高于坡耕地的C、N和P,并且C和N相对P增加更多。

苹果由于其经济和生态效益,是黄土高原植被恢复过程中的优势树种之一^[12]。黄土塬区苹果种植始于20世纪80年代,在1999年国家实施退耕还林(草)工程的背景下,苹果种植面积大量扩张,经过近40a的发展,塬区大量苹果进入老龄化,产量下降,同时为保障国家粮食安全需求,黄土塬区果园被大量转化为农田^[13]。土地利用方式发生变化后,揭示土壤生态化学计量特征对其响应特征对于农田管理具有重要意义,然而目前关于该方面的研究鲜有报道。因此,本文以黄土塬区中老龄化果园(30 a)和老龄化果园转变为不同还耕年限农田为研究对象,旨在分析:1)不同还耕年限农田土壤SOC、TN和TP质量分数及生态化学计量特征的时空变化特征;2)引起土壤SOC、TN和TP及化学计量特征变化的主要影响因素。研究结果可为黄土高原粮食安全和可持续发展提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武塬区(35°12′~35°16′N, 107°38′~107°58′E)(图1)。该区域是黄土高原典型沟壑地貌,塬面海拔1 215~1 225 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年降水量580 mm,主要集中在7—9月,占年总降水量的1/2。年平均气温9.1℃,无霜期171 d,地下水位50~80 m。该地带性土壤以黑垆土为主,其母质中富含中壤质马兰黄土,土壤结构疏松,透气性强,具备较强的储水能力。主要土地利用类型为农田和果园,二者主要依赖于自然降雨,缺乏人工灌溉设施^[14],属于典型的旱作雨养农业区。

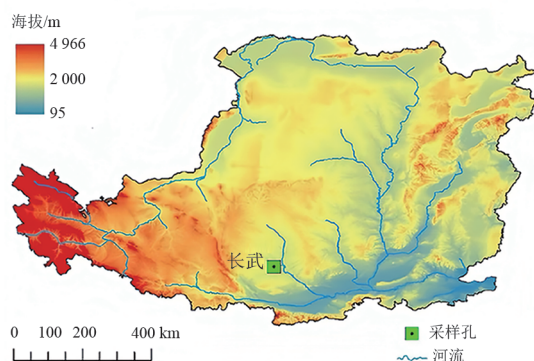


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 为避免地形、地貌等因素对试验结果的影响,采样点均位于平坦的塬面,且水平间距较小。由于长武塬区砍伐果园的林龄一般为30 a(访问当地农户得知),故本研究选取塬区内林龄30 a(衰老期)的苹果园和转化的农田作为研究对象,即果园(还耕0 a)、还耕1 a、还耕3 a和还耕5 a的农田,同时选取种植粮食作物的农田(CK)作为对照,不同还耕农田管理措施一致。每个样地布设的样方面积为20 m×20 m,在每个研究样地内使用人工土钻沿“S”形选取5个点采样,采样深度0~100 cm,采样间隔10 cm,并将5个点按每层分别混合成1个样品,共150个土壤样品。使用塑封袋采集扰动土,同时采用环刀采集各土层的原状土测定土壤体积质量,用铝盒采集各土层鲜土测定土壤水分^[15]。

将采集好的土壤样品放置于阴凉干燥处,自然风干后研磨,采用四分法取适量土壤样品,过2、0.25 mm筛备用。土壤水分采用烘干法(105℃,10 h)测定;土壤体积质量采用环刀法(105℃,10 h)测定;土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国)测定,根据国际制土壤粒径分为土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和砂粒(2~0.02 mm);土壤pH

采用电位法(水:土=2.5:1)测定;土壤SOC采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤TN采用凯氏定氮法测定;土壤TP采用钼锑抗分光光度法测定^[16]。

1.2.2 分析方法 1)土壤样品中水分质量分数计算公式为:

$$\text{土壤水分质量分数} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为烘干后空铝盒重量,g; m_1 为烘干前铝盒及土样重量,g; m_2 为烘干后铝盒及土样重量,g。

2)土壤样品的体积质量(ρ ,g/cm³)计算公式为:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V \times (1000 + W)} \quad (2)$$

式中: m_1 为环刀质量,g; m_2 为环刀及湿土质量,g; V 为环刀容积,cm³; W 为土壤质量分数,g/kg。

3)差值变化率(%)可反映果园还耕后土壤养分质量分数及生态化学计量比相对于CK的变化程度,计算公式为:

$$\text{差值变化率} = \frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_1 为果园还耕后的养分质量分数及生态化学计量比; X_2 为CK的养分质量分数及生态化学计量比。

1.3 数据统计

运用Excel 2021软件对数据进行基本描述性统计分析(平均值、最大值、最小值等),利用SPSS 22.0软件对不同还耕年限农田土壤的各种理化因子间的差异性进行单因素方差分析(ANOVA),利用Canoco 5软件进行冗余分析,运用Origin 2021软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同还耕年限农田土壤基本理化性质

由表1知,随着还耕年限的增加,果园还耕后农田0~100 cm土壤粉粒的平均质量分数呈增加趋势,而砂粒平均质量分数呈减小趋势,黏粒无明显规律。不同还耕年限农田的黏粒质量分数的平均值均小于纯农田(CK),而砂粒质量分数平均值大于CK。不同还耕年限农田的体积质量均值变化幅度较小,无明显趋势,但均大于CK,且与CK差异显著($p < 0.05$)。与体积质量类似,不同还耕年限农田土壤的体积分数和pH平均值无明显规律,但体积分数与CK无显著性差异($p > 0.05$),pH与CK差异显著($p < 0.05$)。

2.2 不同还耕年限农田土壤碳氮磷特征

由表1可知,不同还耕年限农田和CK在0~100 cm土层SOC平均值分别为12.23(0 a)、11.15(1 a)、10.81(3 a)、11.16(5 a)和10.53 g/kg(CK);TN的平均值分别为0.90(0 a)、0.79(1 a)、0.76(3 a)、0.83(5 a)、0.75 g/kg(CK);TP的平均值分别为1.03

(0 a)、0.81 (1 a)、0.68 (3 a)、0.67 (5 a)、0.60 g/kg(CK)。整体随着还耕年限的增加,土壤中 TN 平均值先降低再增加趋势,TP 平均值逐渐降低。

随着土层深度的增加,不同还耕年限和 CK 土壤中的 SOC、TN 和 TP 质量分数整体上均呈下降趋势(图 2a~图 2c)。同时,相较于 CK,在 60~100 cm 土层的土壤 SOC、TN 和 TP 的质量分数变化幅度较小(图 2d~图 2f)。

表 1 不同还耕年限农田 0~100 cm 土层土壤理化性质

还耕 年限/a	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	BD/ (g·cm ⁻³)	SWC/ (g·kg ⁻¹)	pH	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
0	33.03± 1.28b	58.33± 1.28c	8.64± 2.22a	1.39± 0.02b	18.17± 0.23ab	7.81± 0.01c	12.23± 0.59a	0.90± 0.04a	1.03± 0.13a	13.60± 0.46a	14.46± 0.85c	1.08± 0.06b
1	35.26± 0.48ab	60.04± 0.32bc	4.71± 0.36b	1.37± 0.02b	18.72± 0.29a	7.76± 0.05c	11.15± 0.34b	0.79± 0.03b	0.81± 0.07b	14.36± 0.33b	15.21± 0.70b	1.06± 0.05b
3	33.81± 0.63b	61.75± 0.35ab	4.44± 0.489b	1.44± 0.01a	17.45± 0.19c	8.11± 0.02a	10.81± 0.32c	0.76± 0.02b	0.68± 0.05c	14.40± 0.30b	17.13± 0.72a	1.19± 0.04ab
5	34.01± 0.41b	62.42± 0.49a	4.67± 0.32b	1.37± 0.02b	18.02± 0.19bc	7.75± 0.01c	11.16± 0.44b	0.83± 0.02c	0.67± 0.04c	13.42± 0.25ab	17.63± 0.60a	1.28± 0.04a
CK	36.43± 1.07a	59.74± 0.82bc	3.83± 0.49b	1.32± 0.01c	17.85± 0.18bc	8.00± 0.02b	10.53± 0.34c	0.75± 0.03b	0.60± 0.01c	14.08± 0.26a	17.22± 0.43a	1.25± 0.02a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同还耕年限间差异显著($p<0.05$)。下同。

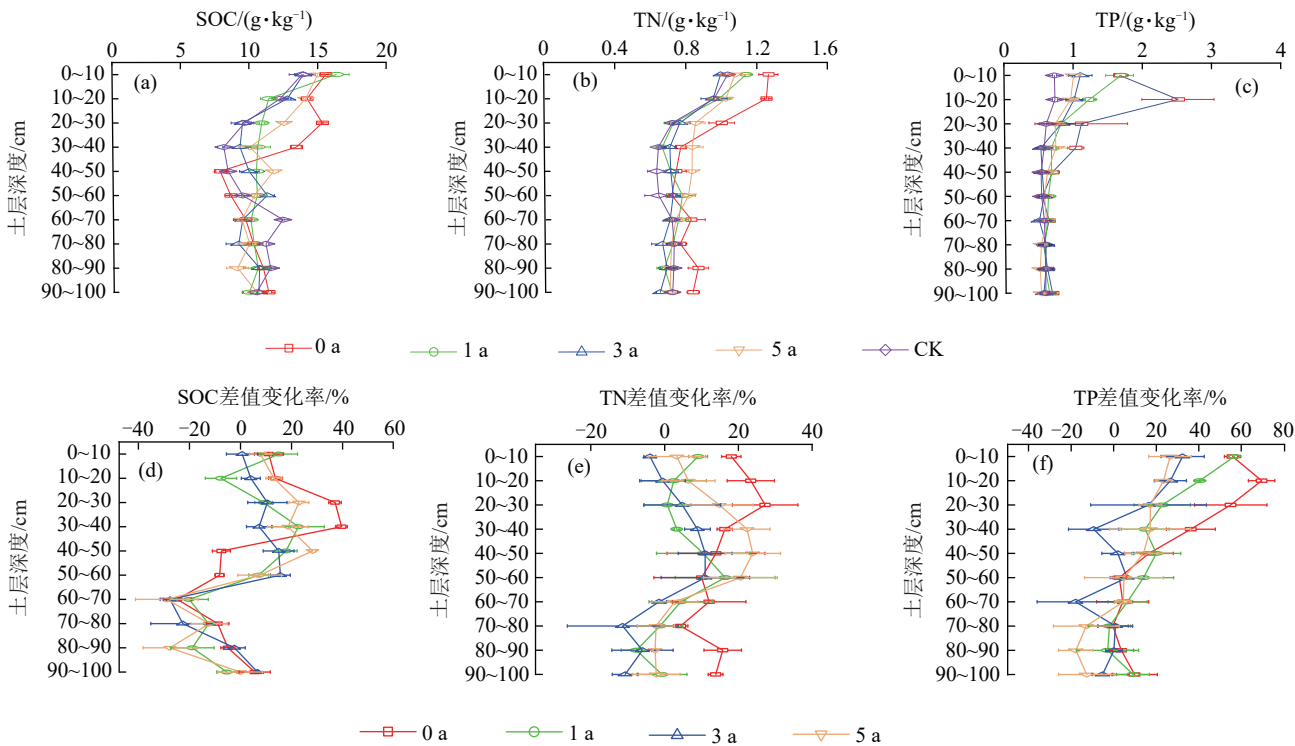


图 2 不同还耕年限 0~100 cm 土层 SOC、TN 和 TP 的质量分数及差值变化率

Fig. 2 The contents and differential rates of change of SOC, TN, and TP in 0—100 cm soil layer in farmlands coverted from orchards for different years

2.3 不同还耕年限农田土壤生态化学计量特征

由图 3a~图 3c 可知,不同还耕年限农田和 CK 在 0~100 cm 土层中的 C:N 的平均值分别为 13.60 (0 a)、14.36 (1 a)、14.40 (3 a)、13.42 (5 a) 和 14.08 (CK);C:P 的平均值分别为 14.46 (0 a)、15.21 (1 a)、17.13 (3 a)、17.63 (5 a) 和 17.22 (CK);N:P 的平均值分别为 1.08 (0 a)、1.06 (1 a)、1.19 (3 a)、1.28 (5 a) 和

1.25 (CK)。整体上,随着还耕年限的增加,C:P 和 N:P 逐渐增加,且二者平均值在还耕 5 a 后超过 CK;随土层深度的增加,不同的还耕年限果园的 C:P、N:P 整体呈先增大后减小的趋势,而 C:N 无明显变化规律。相较于 CK,在 0~60 cm 土层 C:P 和 N:P 均下降,而 60 cm 以后的变化幅度较小(图 3d~图 3f)。

2.4 不同还耕年限农田碳氮磷化学计量特征变化的影响因素

由图 4 可知,SOC、TN、TP 均与砂粒呈极显著正相关($p<0.01$),与黏粒呈极显著负相关($p<0.01$)。TN 和 TP 与体积分数呈极显著正相关($p<$

0.01),C:N 与 C:P 呈极显著正相关($p<0.01$),C:N 与体积分数呈极显著负相关($p<0.01$),C:P、N:P 均与黏粒呈极显著正相关($p<0.01$),与砂粒、pH 均呈现极显著负相关($p<0.01$)。

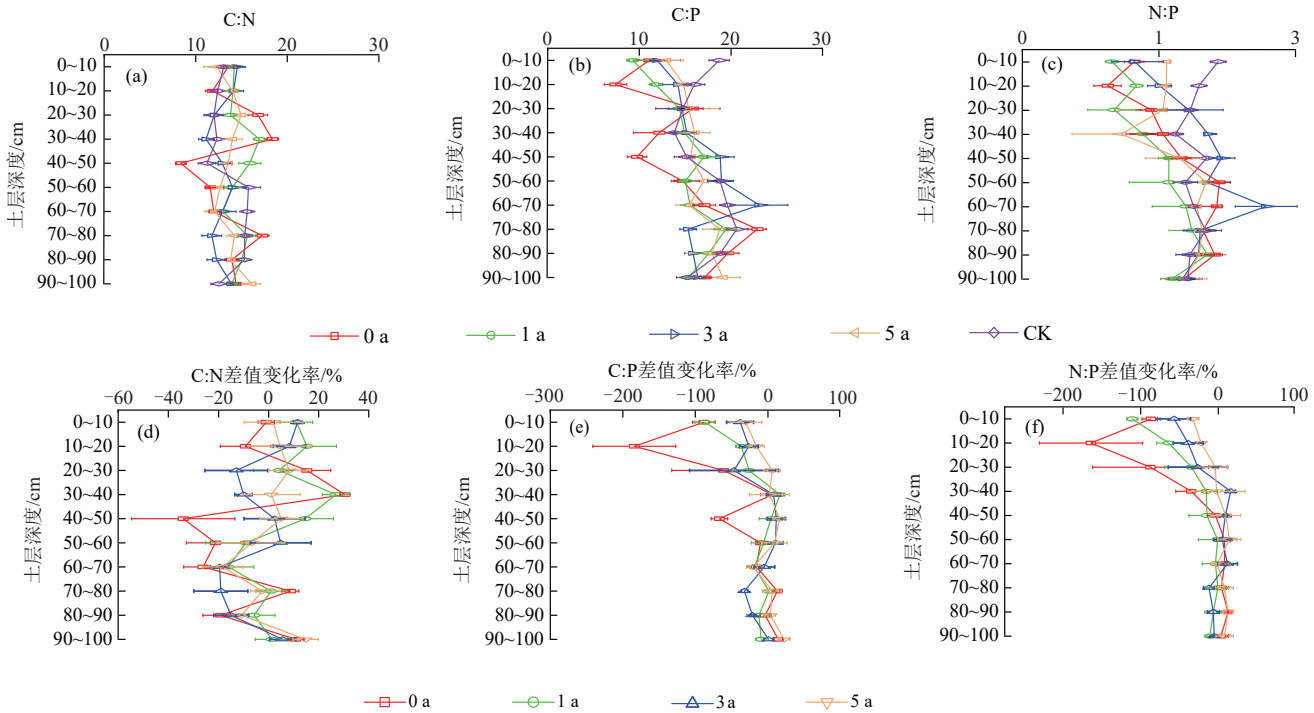
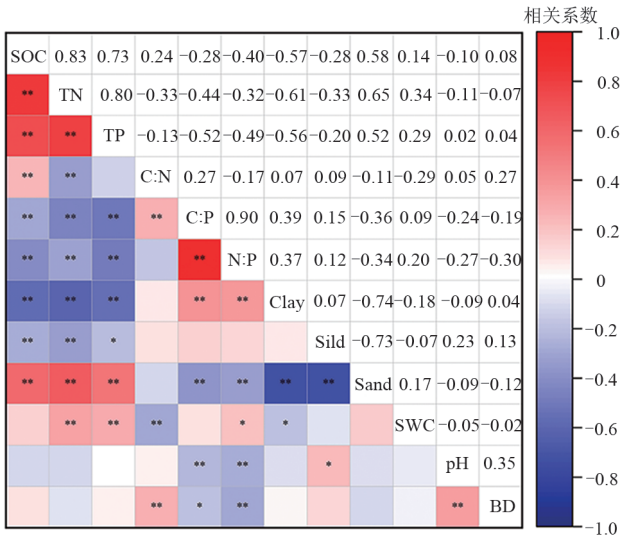


图 3 不同还耕年限下 0~100 cm 土层 C:N、C:P 和 N:P 及其差值变化率

Fig. 3 C:N, C:P and N:P and the differential rates of change of C:N, C:P and N:P in 0—100 cm soil layer in farmlands converted from orchards for different years



注: *表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$ 。

图 4 土壤基本理化因子与土壤生态化学计量比的相关性
Fig. 4 Correlations between soil physical and chemical properties and ecological stoichiometric ratios

为进一步分析其影响因素,从土层深度和还耕年限 2 个维度对土壤理化因子与土壤生态化学计量特征进行冗余分析。对不同土层深度(图 5),在

0~10 cm 土层, I 轴的解释量为 63.9%, II 轴的解释量为 11.5%, 土壤体积质量是主要的影响因素; 在 10~20 cm 土层, I 轴的解释量为 70.6%, II 轴的解释量为 17.7%, 土壤中的黏粒和砂粒成为影响土壤碳氮磷及生态化学计量变化的主要因素; 在 20~40 cm 土层, I 轴的解释量为 27.1%, II 轴的解释量为 4.1%, 砂粒占比为主要影响因素; 在 40~60 cm 土层, I 轴的解释量为 46.1%, II 轴的解释量为 3.3%, 砂砾占比为主要影响因素; 在 60~100 cm 土层, I 轴的解释量为 5.3%, II 轴的解释量为 3.3%, 土壤体积质量是主要的影响因素, 但无显著相关性。可能是由于 60~100 cm 土层不同还耕年限土壤碳氮磷及化学计量变化率差异较小(图 2d~图 2f 和图 3d~图 3f)。

不同还耕年限方向(图 6), 在果园还耕 0 a 的土壤中, 土壤性质在 I 轴的解释量为 47.6%, II 轴的解释量为 14.6%, 黏粒占比为主要的因素; 在果园还耕 1 a 的土壤中, 土壤性质在 I 轴的解释量为 47.1%, II 轴的解释量为 2.1%, 黏粒占比为主要的因素; 在果园还耕 3 a 的土壤中, 土壤性质在 I 轴的

解释量为 40.0%，Ⅱ 轴的解释量为 5.7%，砂粒占比为主要的因素；在果园还耕 5 a 的土壤中，土壤性质

在 I 轴的解释量为 16.6%，Ⅱ 轴的解释量为 3.5%，砂砾占比为主要的因素。

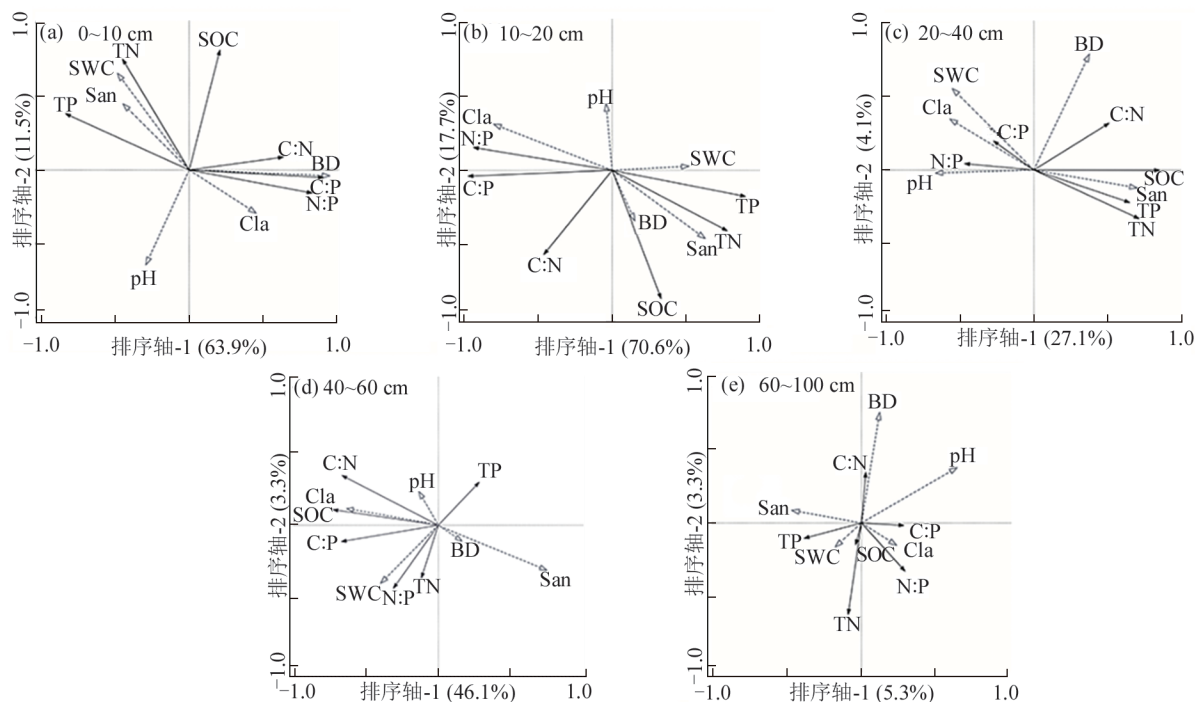


图 5 土壤基本理化因子与土壤生态化学计量比在不同土层深度的冗余分析(RDA)

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of soil physical and chemical properties and ecological stoichiometric ratios at different soil depths

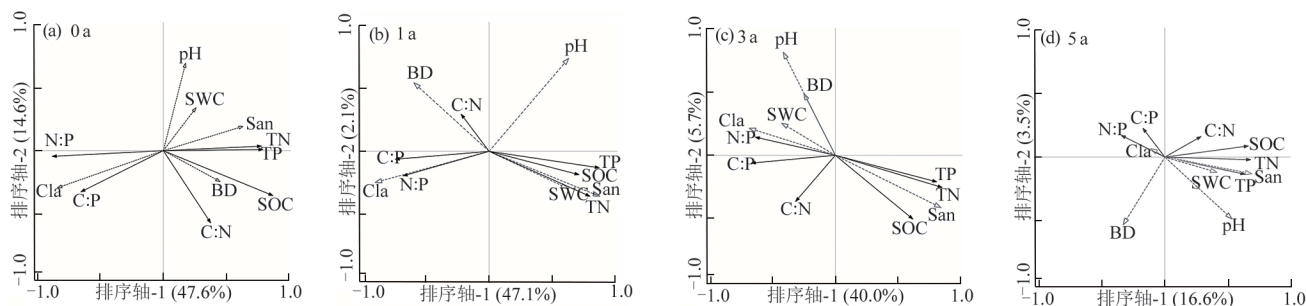


图 6 土壤基本理化因子与土壤生态化学计量比在不同还耕年限的冗余分析(RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) of soil physical and chemical properties and ecological stoichiometric ratios at different years after conversion of orchards into farmlands

3 讨论

3.1 不同还耕年限农田土壤碳氮磷的变化特征

土壤中的 C、N 和 P 受到物质输入和输出平衡的调节,同时受植被类型、土地利用方式和其他环境因素的影响^[17]。本研究得出,果园转化为农田后(0 a)土壤 TN 和 TP 发生显著变化($p < 0.05$,表 1),与海旭莹等^[10]得出不同土地利用方式对土壤养分有显著影响的结果类似。本研究还得出,随着还耕年限的增加,土壤中的 SOC、TN 呈先降低再增加,TP 呈逐渐下降的趋势(图 2)。一方面,由于果树根系可以分泌黏液和糖类物质,增加土壤颗粒的结合强度,将土壤中细小的颗粒物聚集,促进土壤养分的堆积^[18];另一方面,由于大量施肥,果园的 SOC、TN 和 TP 处于

较高水平,当老龄化果树还耕后,土壤中原有的养分被新种植的农作物消耗,同时还受到人为干扰因素(如翻耕、松土等)的影响,使还耕初期土壤 SOC、TN 和 TP 持续下降^[19]。到还耕 5 a,土壤中的 SOC、TN 又呈上升趋势,可能与果树根系的腐烂有关。根据调研结果^[20]显示,苹果在砍伐时仅去除地上部分,根系继续留在土壤中,随着时间的推移,果树根系逐渐腐烂并释放出大量的养分,从而提高土壤 SOC 和 TN。但相对于 SOC 和 TN 元素,TP 在土壤中的循环速度较慢,磷的释放和吸收通常需要更长的时间^[21]。因此,TP 未及时得到恢复,而是保持持续下降的趋势。果园还耕后农田中的 SOC、TN 和 TP 平均值均高于 CK(表 1),可能是由于果蔬与经济作物

的种植方式不同,前者的施肥量显著高于后者^[22-23],果园在种植期间投入更多的养分,而还耕后较高的养分水平滞留在土壤中,导致还耕后土壤SOC、TN和TP仍高于CK。

随土层深度的增加,土壤中的SOC、TN、TP整体呈下降趋势(图2),主要是由于施肥、秸秆、枯落物等主要集中在土壤表层,同时表层土壤具有更活跃的微生物参与有机质的分解和养分的循环,因此,表层土壤具有较高的SOC、TN和TP质量分数^[24]。随着土层深度的增加,生物活动逐渐减少,导致深层土壤中的SOC、TN和TP质量分数相对较低。

3.2 不同还耕年限农田土壤生态化学计量特征变化

C:N可评估土壤中有机质的矿化速度^[25],随还耕年限的增加,土壤中C:N平均值无显著差异性($p>0.05$),且随土层深度的增加,C:N也无明显的变化规律(图3),与朱秋莲等^[26]的研究结果一致。是因为土壤中的C和N元素具有极显著的正相关关系,且可同时对环境变化作出响应^[27],导致不同还耕年限和不同深度C:N均无显著性差异。

土壤C:P反映土壤环境中吸收和固定磷元素的潜力,可指示磷的有效性,较低的C:P说明土壤P有效性较高^[21];N:P可反映植被生长受N和P营养元素限制情况的程度^[28]。随着还耕年限的增加,C:P和N:P平均值逐渐增加,是由于随还耕年限的增加,土壤中的TP逐渐下降,SOC和TN先降低再增加,但SOC和TN的减小趋势远小于TP(图3),使C:P、N:P呈逐渐增加趋势。表明随着还耕年限的增加,土壤中P逐渐匮乏且有效性逐渐降低。

研究^[25]表明,较高的C:N预示着较低的土壤矿化和腐殖化速率。本研究得出,不同还耕年限农田土壤及CK的C:N平均值均高于中国土壤C:N平均值(13.33)^[29],因此,该地区的土壤矿化速度较慢,土壤中的C处于积累趋势。研究^[30]表明,当土壤N:P<10时,植被的生长发育受到N限制。本研究中不同还耕年限农田土壤及CK的N:P平均值均远低于全球(13.10)和全国水平(9.3)^[29],同时还耕后农田土壤及CK中的质量分数平均值也均低于全国平均土壤中氮(1.88 g/kg)^[31],因此,该地区土壤中可能也存在一定程度的氮缺乏现象,可以适当增加氮肥施用量。

3.3 不同还耕年限农田土壤生态化学计量特征的影响因素

本研究得出,不同还耕年限农田的TN和TP均与水分体积分数呈极显著正相关($p<0.01$,图4),充足的水分体积分数能使土壤中的微生物保持相对活

跃的状态,更积极地将土壤中的枯落物、根系等有机物质分解转化为养分^[32],导致土壤中TN和TP上升,因此,土壤中的TN和TP与水分体积分数呈正相关。本研究得出,SOC、TN与pH呈负相关(图4),与梁国华等^[31]的研究结果一致,较低的pH通常与更酸性的土壤环境相关。当土壤处于较酸性条件时,土壤微生物生物量碳氮质量分数降低,导致土壤微生物活性受到抑制,从而抑制土壤中有机物的矿化和分解,导致土壤中的C、N积累。本研究还得出,不同还耕年限农田的SOC、TN和TP均与砂粒呈极显著正相关($p<0.01$),与黏粒呈极显著负相关($p<0.01$)(图4)。有研究^[29,33]得出,土壤SOC、TN和TP与土壤黏粒呈正相关,与本文结果不同,是由于本文在研究过程中纳入土层深度作为自变量。表层土壤中的黏粒和粉粒等细颗粒物易受雨水渗透而流失^[34],且也随水分向土层深处迁移,而砂粒粒径较大,易滞留于表层土壤中。本研究中的老龄化果园改种粮食作物后,由于苹果根系腐烂形成根孔,增大入渗速率,使土壤水分迅速恢复^[20],从而加速黏粒和粉粒等细小颗粒物向土层深处迁移。因此,随土层深度的增加,土壤中的黏粒和粉粒呈增加趋势,而砂粒呈减小趋势,土壤SOC、TN和TP也随土层深度增加呈减小趋势(图2)。因此,土壤中的SOC、TN和TP与砂粒呈正相关。

冗余分析结果(图5,图6)表明,从还耕年限和土层深度2个维度,除0~10 cm外,其他影响土壤碳、氮、磷及化学计量比变化的主要因素是土壤颗粒组成。一方面,土壤颗粒的大小、表面特性及其对有机质的吸附能力等因素,使其对土壤中碳、氮、磷等元素的存储、释放和循环过程具有重要影响^[35];另一方面,果园被砍伐后,在2 a时间内0~8 m土壤水分迅速恢复^[20],造成土壤颗粒组成的垂直迁移,导致土壤颗粒成为主要影响因素。

4 结论

1)果园转化为农田后不同还耕年限的C:N无明显变化,而C:P和N:P随还耕年限的增加而增加,表明随着还耕年限的增加,土壤中磷逐渐匮乏且有效性逐渐降低。

2)不同还耕年限农田土壤中的TN质量分数与N:P均低于全国及全球水平,表明该地区土壤中可能存在一定程度的氮缺乏现象。

3)冗余分析结果表明,土壤颗粒组成是影响还耕后土壤中SOC、TN、TP及生态化学计量特征变化的主要因素。因此,在未来对于果园还耕较长的农田应注意及时补充磷肥和氮肥。

参考文献:

- [1] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
HE J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6.
- [2] SARDANS J, JANSSENS I A, PHILIPPE C, et al. Recent advances and future research in ecological stoichiometry[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2021, 50: e125611.
- [3] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.
ZENG Q C, LI X, DONG Y H, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [4] 黄庄,黑杰,刘旭阳,等.互花米草入侵对滨海湿地不同质地土壤碳氮磷及其生态化学计量比的影响[J].土壤, 2023, 55(2): 340-347.
HUANG Z, HEI J, LIU X Y, et al. Effects of spartina alterniflora invasion on soil carbon, nitrogen and phosphorus and their ecological stoichiometric ratios in coastal wetlands of different textures[J]. Soils, 2023, 55(2): 340-347.
- [5] 李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报, 2024, 38(4): 95-102.
LI A, YU Z J, WANG D F, et al. Response of soil and water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 95-102.
- [6] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19.
- [7] WANG R, DONG Z B, ZHOU Z C, et al. Effect of vegetation patchiness on the subsurface water distribution in abandoned farmland of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: e141416.
- [8] 胡亚伟,孙若修,申明爽,等.晋西黄土区土地利用方式对土壤C:N:P化学计量特征及土壤理化性质的影响[J].干旱区研究, 2021, 38(4): 990-999.
HU Y W, SUN R X, SHEN M S, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C:N:P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi loess region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 990-999.
- [9] 沙国良,陈宇轩,魏天兴,等.黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素[J].土壤, 2022, 54(6): 1265-1272.
SHA G L, CHEN Y X, WEI T X, et al. Distribution of soil carbon and its driving factors under typical restored vegetation in hilly areas of Loess Plateau[J]. Soils, 2022, 54(6): 1265-1272.
- [10] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地C、N、P生态化学计量特征对植物多样性的影响[J].生态学报, 2020, 40(23): 8570-8581.
HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8570-8581.
- [11] 高德新,张伟,任成杰,等.黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征[J].生态学报, 2019, 39(10): 3622-3630.
GAO D X, ZHANG W, REN C J, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil and leaves during the recovery process of typical vegetation on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3622-3630.
- [12] 张聪颖,畅倩,霍学喜.中国苹果生产区域变迁分析[J].经济地理, 2018, 38(8): 141-151.
ZHANG C Y, CHANG Q, HUO X X. Analysis on the layout of China's apple production transition[J]. Economic Geography, 2018, 38(8): 141-151.
- [13] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45(1): 223-243.
- [14] 王锐,刘文兆,李丽霞.土地利用类型对黄土塬区深层土壤含水量的影响:以长武塬区为例[J].干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 127-132.
WANG R, LIU W Z, LI L X. Effect of land use types on the deep soil moisture of the loess tableland: A case of Changwu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(11): 127-132.
- [15] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社, 2006.
SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [16] 张万儒,杨光澄,屠星南,等.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[S].北京:中国林业出版社, 1999.
ZHANG W R, YANG G C, TU X N, et al. Forestry industry standard of the People's Republic of China: Forest soil analysis method [S]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
- [17] 朱奕豪,刘晓丽,陈为峰,等.黄河三角洲废弃盐田复垦

- 土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报, 2020, 34(6): 352-360.
- ZHU Y H, LIU X L, CHEN W F, et al. Eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in reclaimed area of abandoned salt pan in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 352-360.
- [18] 阿丽娅·阿力木, 丛小涵, 夏晓莹, 等. 不同土地利用方式下土壤养分特征变化分析[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 925-933.
- ALIMU A, CONG X H, XIA X Y, et al. Characteristics of soil nutrient under different land use patterns[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(4): 925-933.
- [19] 高静, 李建华, 张强, 等. 黄土高原北部典型县域耕地土壤碳氮时空变异特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2024, 61(3): 674-686.
- GAO J, LI J H, ZHANG Q, et al. Spatial and temporal variation of soil carbon and nitrogen in typical counties of North Loess Plateau and influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(3): 674-686.
- [20] 牛虎虎, 赵西宁, 高晓东, 等. 苹果园改种粮食作物渭北旱塬深层土壤水氮变化特征[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5926-5936.
- NIU H H, ZHAO X N, GAO X D, et al. Variation characteristics of the deep soil water and nitrogen in orchards in Weiwei dry plateau after replanting food crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5926-5936.
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [22] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983—2009年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 132-140.
- ZHAO Y T, CHANG Q R, LI Z P, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 132-140.
- [23] 韦安胜, 陈竹君, 康婷婷, 等. 秦岭北麓周至县俞家河小流域土壤养分空间变异研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 128-132.
- WEI A S, CHEN Z J, KANG T T, et al. Spatial variability of soil nutrients of Yujia Catchment in Zhouzhi at the northern piedmont of Qinling Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 128-132.
- [24] 王思瑶, 王玉娟, 邱开阳, 等. 贺兰山土壤微生物生物量C、N、P化学计量特征沿海拔梯度的变化规律及其影响因素[J]. 草业科学, 2024, 41(7): 1558-1570.
- WANG S Y, WANG Y J, QIU K Y, et al. Variation regularity of stoichiometric characteristics of soil microbial biomass C, N, and P along the altitudinal gradient and their influencing factors in Helan Mountains[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(7): 1558-1570.
- [25] 赵华晨, 高菲, 李斯雯, 等. 长白山阔叶红松林和杨桦次生林土壤有机碳氮的协同积累特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1615-1624.
- ZHAO H C, GAO F, LI S W, et al. Co-accumulation characters of soil organic carbon and nitrogen under broadleaved Korean pine and *Betula platyphylla* secondary forests in Changbai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1615-1624.
- [26] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- ZHU Q L, XING X Y, ZHANG H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [27] CARTER M R, RENNIE D A. Dynamics of soil microbial biomass N under zero and shallow tillage for spring wheat, using ^{15}N urea[J]. Plant and Soil, 1984, 76: 157-164.
- [28] 李文琦, 项琦, 解雪峰, 等. 互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2735-2745.
- LI W Q, XIANG Q, XIE X F, et al. Effect of spartina alterniflora invasion on soil C: N: P stoichiometry in coastal wetland of Hangzhou Bay[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2735-2745.
- [29] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [30] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W, VERHOEVEN J T A. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands[J]. Ecological Applications, 2003, 13(2): 372-384.
- [31] 梁国华, 张德强, 卢雨宏, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤C: N: P生态化学计量特征对长期模拟酸雨的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 844-851.
- LIANG G H, ZHANG D Q, LU Y H, et al. Responses of soil C: N: P stoichiometry to long-term simulated acid rain in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan nature reserve[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 844-851.

(下转第308页)

- [23] ZHAO X Y, TAN S C, LI Y P, et al. Quantitative analysis of fractional vegetation cover in southern Sichuan urban agglomeration using optimal parameter geographic detector model, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: e111529.
- [24] 贾一越, 齐璇璇, 黄蕊, 等. 山西省植被覆盖度的时空变化及驱动因子[J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1073-1082.
JIA Y Y, QI X X, HUANG R, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1073-1082.
- [25] 胡蓉, 董灵波. 黑龙江流域植被覆盖度时空动态及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1518-1524.
HU R, DONG L B. Temporal and spatial variations of vegetation coverage in Heilongjiang basin and its responses to climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1518-1524.
- [26] 奎国娴, 史常青, 杨建英, 等. 内蒙古草原区植被覆盖度时空演变及其驱动力[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2713-2722.
KUI G X, SHI C Q, YANG J Y, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving force in Inner Mongolia grassland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2713-2722.
- [27] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434-443.
- [28] 刘逸娴, 张军, 唐莹, 等. 昆明市 2011—2020 年植被覆盖时空变化特征分析及其归因[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8124-8132.
LIU Y X, ZHANG J, TANG Y, et al. Analysis of spatiotemporal variation of vegetation coverage in Kunming City from 2011 to 2020 based on MODIS₃DVI and its attribution [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8124-8132.
- [29] 金燕, 况雪源, 晏红明, 等. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象, 2018, 44(9): 1169-1178.
JIN Y, KUANG X Y, YAN H M, et al. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1169-1178.
- [30] 张青雯, 崔宁博, 赵禄山, 等. 基于相对湿润指数的云南省季节性干旱变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 278-284.
ZHANG Q W, CUI N B, ZHAO L S, et al. Seasonal drought characteristics based on relativemoisture index in Yunnan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 278-284.
- [31] 王胜国, 许丽人, 庞宇婷, 等. 基于强度-持续时间-面积的干旱相似性研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2024: 1-14. <http://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20241018.1352.008>.
WANG S G, XU L R, PANG Y T, et al. Drought similarity analysis based on intensity-duration-area characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024: 1-14. <http://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20241018.1352.008>.
- [32] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
JIAO K W, GAO J B, WU S H, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2229-2238.
- (上接第 297 页)
- [32] 袁建钰, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1803-1812.
YUAN J Y, LI G, YAN L J, et al. Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1803-1812.
- [33] 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 等. 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2848-2858.
HUANG S W, ZHAO Y K, ZHU X Y, et al. Integrated analysis of soil organic matter molecular composition changes under different land uses [J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2848-2858.
- [34] 刁二龙, 曹广超, 袁杰, 等. 香日德—柴达木河流域不同土地利用方式下土壤颗粒分形特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(10): 2353-2360.
DIAO E L, CAO G C, YUAN J, et al. Fractal characteristics of soil particles under different land use patterns in Xiangride-Chaidamu River basin [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(10): 2353-2360.
- [35] LU J N, FENG S, WANG S K, et al. Patterns and driving mechanism of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry across Northern China's desert-grassland transition zone[J]. Catena, 2023, 220: e106695.