

刘畅, 周明华, 张博文, 等. 张家口坝上地区土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 土壤与作物 2021, 10(3): 333–343.
LIU C, ZHOU M H, ZHANG B W, et al. Effects of land use patterns on soil physio-chemical properties in Zhangjiakou area[J]. Soils and Crops 2021, 10(3): 333–343.

张家口坝上地区土地利用方式对土壤理化性质的影响

刘畅^{1,2,3}, 周明华², 张博文^{2,3}, 王兴灵^{2,3}, 任兵², 彭韬¹, 罗维均¹, 谷丰²
(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤理化性质作为土壤健康评价的重要指标, 对土地利用方式响应敏感。为揭示张家口坝上地区土地利用类型对土壤理化性质的影响, 本研究以张家口市坝上地区草地、林地、菜地和常规耕地 4 种主要土地利用类型为研究对象, 分析了 0~15 cm 和 15~30 cm 土层的 pH、容重、有机碳 (SOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和有效态微量元素等物理化学指标的性质差异及其影响因素。研究表明, 表层 (0~15 cm) 土壤容重在四种土地利用类型中差异不显著, 但菜地和耕地底层 (15~30 cm) 土壤容重 ($1.62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 显著高于林地 ($1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和草地 ($1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 表现出耕作导致的物理压实性。菜地和耕地表层和底层土壤 pH 显著低于林地和草地。菜地表层 (0~15 cm) 和底层 (15~30 cm) 土壤的 SOC 含量和 TN 含量在四种土地利用方式中最高, 且有效铜 ($0.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和有效锌 ($2.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量显著高于其余三种土地利用方式。草地 ($2.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和菜地土壤 ($2.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) TP 含量都显著高于林地和耕地。土壤 SOC、TN 和 TP 含量均与土壤粘粒含量呈极显著正相关关系; 有效铁、锰和锌含量与土壤 pH 呈极显著负相关关系, 有效铁、锰、铜和锌含量与 SOC 含量呈正相关关系。研究结果可为坝上地区土地资源科学管理和可持续利用提供基础支撑。

关键词: 土壤性质; 土地利用方式; 张家口; 草地; 林地; 菜地; 耕地

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 2095–2961 (2021) 03–333–11

DOI: 10.11689/j.issn.2095–2961.2021.03.010

Effects of land use patterns on soil physio-chemical properties in Zhangjiakou area

LIU Chang^{1,2,3}, ZHOU Minghua², ZHANG Bowen^{2,3}, WANG Xingling^{2,3}, REN Bing², PENG Tao¹, LUO Weijun¹, GU Feng²
(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil physical and chemical property, as important index for soil health evaluation, is sensitive to land use patterns. In order to understand the effects of land use patterns on the soil physical and chemical property in the Bashang area of Zhangjiakou City, four main land use patterns including grassland, woodland, vegetable land and conventional cropland were selected, and then soil pH, bulk density, SOC, TN, TP and available trace elements in the 0~15 cm and 15~30 cm soil depths were analyzed. Results showed that, bulk densities of surface soil (0~15 cm) had no significant difference among the four land use types. However, bulk densities of subsurface soil (15~30 cm) in vegetable land and cropland ($1.62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) were significantly higher than that in woodland ($1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and grassland ($1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), indicating the physical compaction caused by tillage. The pH of surface and subsurface soil of vegetable land and cropland was significantly lower than that of woodland and grassland. SOC contents and nitrogen content in vegetable soil of the 0~15 cm and 15~30 cm depth were with the highest value in 4 land use patterns, and the contents of available Cu ($0.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and available Zn ($2.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were significantly greater than those of other 3 land use patterns. TP contents of grassland ($2.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and vegetable land ($2.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) were significantly higher than those of forestland and cropland. The contents of SOC, TN and TP were all significantly positively correlated with the content of soil clay particles; while the contents of available Fe, available Mn and available Zn were significantly negatively correlated with soil pH; there was a significant positive correlation between the content of SOC and contents available of Fe, Mn, Cu and Zn. These results can provide the foundation support for the scientific management and sustainable utilization of land resources in Bashang area.

Key words: soil properties; land use pattern; Zhangjiakou area; grassland; forestland; vegetable land; cropland

收稿日期: 2021–03–15; 修回日期: 2021–07–25.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001) .

第一作者简介: 刘畅 (1994–), 女, 硕士, 研究方向为生物地球化学过程. E-mail: liuchang185@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 谷丰 (1991–), 男, 博士, 研究方向为土壤质量演变. E-mail: guf@imde.ac.cn.

0 引言

土壤健康是指在生态系统和土地利用的范围内,土壤能持续作为有生命的系统维持生物生产力,保持空气和水环境质量,促进植物、动物和人类健康的能力^[1]。土壤理化性质是评价土壤健康程度的重要指标^[2],影响土壤持水能力和养分利用^[3]。土壤容重、颗粒组成等物理性质直接影响土壤持水性能和植被根系生长^[4]。碳氮磷元素作为表征土壤肥力的重要指标,其缺乏不仅导致土壤质量下降,也会限制植物生长^[5]。土壤有效态微量元素如有效态铁、锰、铜和锌等指标对植物生长发育过程中的光合作用、呼吸作用、生长素的合成及枝叶健康成长等至关重要^[6-7]。

土地利用类型是人类活动和自然条件共同作用的综合反映,对土壤理化性质具有重要影响。不同土地利用方式下地表植被类型、物种丰富度及土壤微生物活性不同,不仅改变土壤理化性质,也对养分循环产生了强烈影响^[8-9],最终影响土壤理化性质。王兴灵等^[10]对于华北土石山区的研究表明,耕作会破坏土壤团聚体结构,使土壤有机碳(SOC)极易遭受风和径流侵蚀而损失,导致土壤的持水性和保肥能力下降。耕地长期施用有机肥能够提高土壤SOC和总氮(TN)含量^[11],含锌肥料、农药及牲畜粪便能够提高土壤铜和锌含量^[12-13]。但耕地长期施肥也会导致土壤酸化^[14],长期耕作会压实土壤,影响土壤的水分渗透和作物根系生长^[15]。研究表明,当耕地转化为森林时,物种丰富度会提高,表层土壤的水分蒸发量减少,细小根系和凋落物的分解以及微生物的残留,会改善土壤结构,使土壤中SOC和TN含量增加^[16-17]。与人工林地相比,草地植被覆盖度高,草本植物枯死后生物归还量高于林地,为草地土壤提供氮磷等营养元素^[18]。而土壤微量元素主要受到人类活动的影响,因此其在森林和草地中的分布与耕地不同^[19]。研究不同土地利用方式下的土壤理化性质,有助于了解土地利用变化对土壤健康的影响,从而为制定合理的土地管理措施,实现土地利用的可持续发展提供基础科学依据。

张家口坝上地区处于内蒙高原和华北平原过渡区,是典型的北方农牧交错带,也是“三北”防护林工程实施的重点县^[20]。张家口处于首都经济圈内,近年来随社会经济发展,加速了土地利用方式转变^[21],特别是蔬菜地(水浇地)占比逐渐升高^[22]。因此,研究新形势下土地利用类型对土壤理化性质的影响十分必要。本文以张家口坝上地区的张北县为研究区域,研究草地、林地、菜地和耕地等4种典型土地利用方式对土壤颗粒组成、容重、土壤SOC、TN、总磷(TP)、微量元素铁、锰、铜和锌的有效态含量的影响,阐明张家口坝上地区不同土地利用方式下土壤理化性质的差异及其影响因素,为该地区土地利用方式的优化和生态环境保护提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区地处河北省张家口市张北县内(40°57'N~41°37'N,114°10'E~115°27'E,海拔1300~2128m),全区总面积4185km²,总人口37.2万。张北县位于内蒙古高原南缘的坝上地区,是离京津地区最近的高原地区。研究区属于中温带大陆性季风气候,多年降水量为300~400mm,四季分明,昼夜温差大,阳光充足。研究区土地利用类型主要为耕地、草地和林地,3类土地利用类型占比分别为40%、29.15%和17.84%。气候条件使研究区成为农产品、畜产品的生产基地,农产品主要有甜菜、马铃薯等蔬菜,畜产品主要有牛肉、羊肉和乳品。

1.2 样品采集与分析

研究选定张家口市张北县草地(114.58°E,41.11°N)、人工林地(114.58°E,41.12°N)、集约化菜地(114.676°E,41.128°N)和常规耕地(114.58°E,41.10°N)等4种典型的土地利用类型为研究对象,

进行了野外调查,并在实验室分析测定土壤样品。经现场调查,草地的植被类型以羊草 (*Leymus chinensis*) 为主,人工林地的主要植被类型为杨树 (*Populus L.*),集约化菜地主要种植娃娃菜 (*Baby Chinese Cabbage*),常规耕地为莜麦 (*Avena chinensis*) - 玉米 (*Zea mays L.*) 轮作。集约化菜地已连续种菜8年,春季施有机肥1次,翻地15~20 cm;常规耕地,仅施用化肥。2018年6月对草地、人工林地、集约化菜地和常规耕地等典型土地利用类型区域内土壤进行采样,每种土地利用类型选取了4个具有代表性的取样点(10 m × 10 m),每个样点内挖掘3个土壤剖面进行分层采样(0~15 cm和15~30 cm)。先采集环刀样品,之后采集土层样品,并将2个土层的3个剖面样品分层混合。样品带回实验室后仔细去除杂物,进行自然风干,风干后研磨,分别过20目和100目的筛。野外环刀采集的土样,在回到实验室后,立即称取铝盒与湿土的总重量,然后,在105℃恒温的烘箱中烘干24h,称重。

试验分析指标包括土壤容重、土壤颗粒组成等土壤物理指标和土壤pH、SOC、TN、总磷(TP)、有效铁、有效锰、有效铜和有效锌等土壤化学指标。

样品的分析测试方法参照《土壤农化分析》^[23]。采用吸管法进行测定土壤颗粒组成;土壤pH经1:2.5的土水比浸提后采用pH计(PHS-3C,上海仪电公司)测定;采用元素分析仪(vario TOC cube, Elementar,德国)测定SOC和TN;TP含量使用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定(TU-1900,北京普析);采用三乙三胺乙酸(DTPA)浸提-ICP法测定有效铁、有效锰、有效铜、有效锌。

1.3 数据处理

利用Excel 2020进行数据整理,使用SPSS 24.0软件中的单因素方差分析-最小显著性差异法(LSD)分析不同土地利用类型间的显著性差异,以独立样本T检验法来检验同一土地利用方式不同土壤指标之间的显著性差异。使用Person相关分析法进行土壤参数之间的相关性分析;使用origin2021软件进行主成分分析(PCA)及绘图。

2 结果与分析

2.1 草地、林地、菜地和耕地土壤基本理化性质的差异

不同土地利用方式对土壤理化性质的影响不同(表1)。4种不同土地利用方式下,0~15 cm的土层深度pH值为7.79~8.25,15~30 cm深度的pH值为8.04~8.49,均为碱性。0~30 cm土层土壤中,pH值最高的都为草地,最低的都为菜地,菜地和耕地pH之间无显著差异,但均显著低于草地和林地($P < 0.05$),草地和林地之间pH值无显著差异。0~15 cm土层土壤容重变幅为1.37~1.55 g·cm⁻³,4种土地利用类型之间无显著性差异。15~30 cm土层土壤容重变幅为1.37~1.62 g·cm⁻³,菜地和耕地容重最高,显著高于草地($P < 0.05$)。不同土地利用方式下,土壤颗粒组成在0~15 cm、15~30 cm土壤剖面上无显著差异。而草地和菜地土壤中,下层土壤pH和土壤容重显著高于表层。

2.2 草地、林地、菜地和耕地土壤碳、氮和磷含量的差异

4种土地利用方式下,0~15 cm土层,菜地土壤SOC含量最高(25.2 g·kg⁻¹),分别比草地(13.8 g·kg⁻¹)、林地(7.98 g·kg⁻¹)和耕地(7.35 g·kg⁻¹)高82%、215%和242%(表2);菜地土壤TN含量(2.62 g·kg⁻¹)显著高于其余三种土地利用方式($P < 0.05$),耕地和林地的TN含量无显著差异;林地和菜地土壤C/N最高,且二者之间差异不显著;菜地和草地土壤TP含量都显著高于林地和耕地($P < 0.05$),但两处理间土壤TP含量无显著差异($P > 0.05$)。15~30 cm土层,菜地土壤SOC含量(18.8 g·kg⁻¹)分别比草地(12.4 g·kg⁻¹)、耕地(7.41 g·kg⁻¹)和林地(4.53 g·kg⁻¹)高51%、153%和314%;草地和菜地15~30 cm土层TN含量显著高于林地和耕地($P < 0.05$);土壤TP含量表现为草地 > 菜地 > 耕地和林地($P < 0.05$),耕地和林地土壤TP含量无显著差异。

表1 4种土地利用类型不同深度土层土壤基本理化性质

Table 1 Soil basic physical and chemical properties with different soil depths in 4 land use patterns

土壤深度 Soil depth	土地利用类型 Land use pattern	pH	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%
0~15 cm	草地 Grassland	8.25 ± 0.07 Ba	1.44 ± 0.06 Aa	48.9 ± 5.79 Ab	37.5 ± 4.72 Aa	13.6 ± 1.08 Aab
	林地 Forestland	8.23 ± 0.04 Aa	1.55 ± 0.06 Aa	84.8 ± 4.53 Aa	7.19 ± 3.12 Ab	7.96 ± 1.42 Ab
	菜地 Vegetable land	7.79 ± 0.04 Bb	1.37 ± 0.05 Ba	68.8 ± 1.88 Aab	14.9 ± 1.04 Ab	16.3 ± 0.99 Aa
	耕地 Cropland	8.07 ± 0.06 Aab	1.44 ± 0.02 Ba	85.4 ± 0.28 Aa	5.95 ± 0.24 Ab	8.70 ± 0.28 Ab
15~30 cm	草地 Grassland	8.49 ± 0.02 Aa	1.37 ± 0.07 Ab	61.0 ± 9.12 Ab	27.8 ± 7.86 Aa	11.3 ± 1.70 Aab
	林地 Forestland	8.36 ± 0.04 Aa	1.51 ± 0.04 Aab	73.1 ± 8.31 Aab	13.5 ± 5.02 Aab	13.4 ± 3.53 Aab
	菜地 Vegetable land	8.04 ± 0.04 Ab	1.62 ± 0.06 Ba	70.6 ± 1.52 Aab	13.7 ± 0.77 Aab	15.7 ± 0.85 Aa
	耕地 Cropland	8.05 ± 0.05 Bb	1.62 ± 0.08 Aa	84.6 ± 0.66 Aa	6.82 ± 0.34 Ab	8.60 ± 0.33 Ab

注: 表中同一列不同大写字母表示相同土地利用方式下不同土层之间的差异显著 ($P < 0.05$); 同一列中不同小写字母表示相同土层不同土地利用类型间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different soil depths under the same land use pattern ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences between different land use patterns in the same soil layer ($P < 0.05$). The same is as below.

不同土地利用方式下土壤 SOC、TN、C/N 和 TP 在 0~15 cm、15~30 cm 土壤剖面上差异较小。除菜地土壤 SOC 及林地 C/N 在不同土层间存在显著差异外, 其余各土地利用方式下的表层和下层土壤 SOC、TN、C/N 和 TP 差异均不显著。即菜地 0~15 cm 土层 SOC 含量显著大于 15~30 cm 土层土壤 ($P < 0.05$), 林地土壤 0~15 cm 土层 C/N 显著高于 15~30 cm 土层 ($P < 0.05$)。

表2 4种土地利用类型不同深度土层土壤有机碳、总氮和总磷含量

Table 2 SOC, TN and TP contents with different soil depths in 4 land use patterns

土壤深度 Soil depth	土地利用类型 Land use pattern	有机碳 Soil organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	C/N	总磷 Total phosphorus/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~15 cm	草地 Grassland	13.8 ± 1.48 Ab	1.66 ± 0.17 Ab	8.33 ± 0.11 Ac	2.88 ± 0.26 Aa
	林地 Forestland	7.98 ± 1.27 Ac	0.83 ± 0.12 Ac	9.58 ± 0.41 Aab	1.42 ± 0.06 Ab
	菜地 Vegetable land	25.2 ± 1.01 Aa	2.62 ± 0.08 Aa	9.61 ± 0.08 Aa	2.86 ± 0.09 Aa
	耕地 Cropland	7.35 ± 0.15 Ac	1.10 ± 0.17 Abc	8.65 ± 0.36 Abc	1.45 ± 0.11 Ab
15~30 cm	草地 Grassland	12.4 ± 2.23 Abc	1.51 ± 0.24 Aa	8.13 ± 0.20 Ab	2.95 ± 0.25 Aa
	林地 Forestland	4.53 ± 0.28 Ac	0.54 ± 0.03 Ab	8.69 ± 0.28 Bab	1.16 ± 0.06 Ac
	菜地 Vegetable land	18.8 ± 1.55 Ba	2.00 ± 0.12 Aa	9.22 ± 0.21 Aa	2.34 ± 0.07 Ab
	耕地 Cropland	7.41 ± 0.56 Ac	0.87 ± 0.06 Ab	8.47 ± 0.11 Aab	1.26 ± 0.08 Ac

2.3 草地、林地、菜地和常规耕地土壤有效态微量元素的差异

4种不同土地利用类型下, 0~15 cm 土层, 不同土地利用方式间土壤有效铁含量变幅为 7.35~11.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 菜地土壤有效铁含量显著高于林地 ($P < 0.05$), 其他土地利用方式间无显著差异 (表3); 不同土地利用方式间土壤有效锰含量变幅为 9.63~15.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 菜地土壤有效锰含量显著高于耕地 ($P < 0.05$), 其他土地利用方式间无显著差异 ($P > 0.05$); 土壤有效铜、有效锌含量在不同土地利用方式间变幅为 0.14~0.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.44~2.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 菜地土壤有效铜、有效锌含量显著高于其他三种土地利用方式 ($P < 0.05$)。

15~30 cm 土层, 不同土地利用方式间土壤有效铁含量变幅为 5.92~10.2 mg·kg⁻¹, 其中菜地土壤有效铁含量显著高于林地 ($P < 0.05$), 其他土地利用方式间无显著差异; 不同土地利用方式间土壤有效锰含量变幅为 8.00~11.7 mg·kg⁻¹, 草地、林地、菜地和耕地之间均无显著差异; 土壤有效铜、有效锌含量在不同土地利用方式间变幅为 0.12~0.64 mg·kg⁻¹、0.27~1.26 mg·kg⁻¹, 菜地土壤有效铜、有效锌含量显著高于其他三种土地利用方式 ($P < 0.05$)。

不同土地利用方式下土壤微量元素含量在 0~15 cm、15~30 cm 土壤剖面上差异较小。草地和耕地在 0~15 cm、15~30 cm 土壤剖面上的有效铁、有效锰、有效铜和有效锌含量差异不显著; 林地和菜地土壤有效锌含量在 0~15 cm 土壤剖面上有效锌含量显著高于 15~30 cm 土壤剖面, 有效铁、有效锰和有效铜含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

表3 4种土地利用类型不同深度土层土壤微量元素有效态含量

Table 3 Trace elements contents with different soil depths in 4 land use patterns

土壤深度 Soil depth	土地利用类型 Land use pattern	有效铁 Available Fe/ (mg·kg ⁻¹)	有效锰 Available Mn/ (mg·kg ⁻¹)	有效铜 Available Cu/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 Available Zn/ (mg·kg ⁻¹)
0~15 cm	草地 Grassland	7.96 ± 1.56 Aab	11.6 ± 0.65 Aab	0.39 ± 0.03 Ab	0.44 ± 0.07 Ac
	林地 Forestland	7.35 ± 0.67 Ab	12.1 ± 1.05 Aab	0.14 ± 0.05 Ac	0.59 ± 0.05 Abc
	菜地 Vegetable land	11.5 ± 1.16 Aa	15.2 ± 1.12 Aa	0.59 ± 0.04 Aa	2.04 ± 0.16 Aa
	耕地 Cropland	8.47 ± 1.25 Aab	9.63 ± 1.10 Ab	0.17 ± 0.02 Ac	0.78 ± 0.14 Ab
15~30 cm	草地 Grassland	6.95 ± 0.90 Aab	8.00 ± 0.16 Aa	0.32 ± 0.04 Ab	0.27 ± 0.01 Ac
	林地 Forestland	5.92 ± 0.39 Ab	10.1 ± 1.73 Aa	0.12 ± 0.02 Ac	0.29 ± 0.01 Bc
	菜地 Vegetable land	10.2 ± 0.86 Aa	11.7 ± 0.21 Aa	0.64 ± 0.01 Aa	1.26 ± 0.04 Ba
	耕地 Cropland	8.01 ± 0.95 Aab	9.06 ± 0.84 Aa	0.17 ± 0.01 Ac	0.60 ± 0.07 Ab

2.4 土壤指标之间的相关性和主成分分析

土壤的理化性质之间多数表现出极显著和显著的相关性 (表4、图1): SOC、TN 和 TP 含量两两之间均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 且三者均与砂粒含量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与粘粒含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); SOC 和 TN 均与有效铁含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与有效锰和有效铜呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

有效态铁、锰、铜和锌含量之间除有效铜与有效锌含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 其余有效态微量元素两两之间均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 除有效铜外, 其余三种有效态微量元素均与 pH 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$); 有效铜含量与土壤砂粒含量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤粉粒和粘粒含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

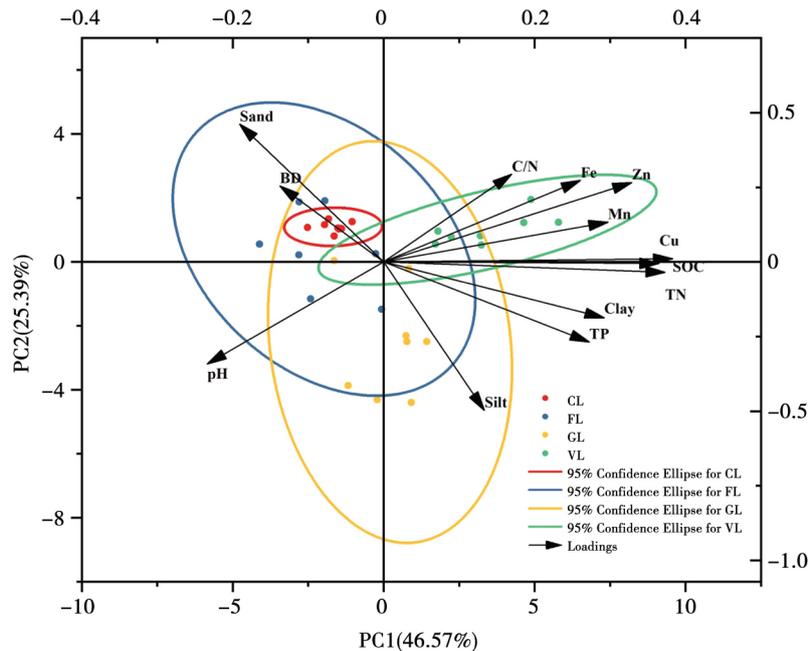
利用主成分分析 (PCA) 对不同土地利用方式的土壤理化性质进行排序 (图1和表5)。分析表明, 前2个PCA轴的累积解释方差比例达79%, 特征值分别为6.05和3.30。其中第一主成分 (PC1) 对土壤理化性质的贡献率为46%, SOC、TN 和有效铜的主成分荷载特征值分别为0.93、0.91和0.90; 第二主成分 (PC2) 对土壤理化性质的贡献率为25%, 粉粒和砂粒的主成分荷载特征值为0.88和0.82。2个主成分的累积贡献率为71%, 代表了采样点土壤理化性质71%的信息量。菜地的C/N、有效铁、有效锰和有效锌与其他土地利用方式离散, 草地的粉粒含量明显与其他土地利用方式离散。

表4 研究区土壤指标之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil indices in the study area

COE	pH	BD	SOC	TN	C/N	TP	Fe	Mn	Cu	Zn	Sand	Silt	Clay
pH	1.000												
BD	-0.055	1.000											
SOC	-0.380	-0.378	1.000										
TN	-0.353	-0.427*	0.993**	1.000									
C/N	-0.428*	0.165	0.431*	0.385	1.000								
TP	-0.102	-0.299	0.683**	0.731**	-0.012	1.000							
Fe	-0.617**	-0.108	0.489*	0.436*	0.380	0.047	1.000						
Mn	-0.567**	-0.315	0.640**	0.539**	0.602**	0.212	0.712**	1.000					
Cu	-0.407	-0.246	0.861**	0.814**	0.282	0.641**	0.573**	0.629**	1.000				
Zn	-0.868**	-0.036	0.430*	0.380	0.503**	0.161	0.645**	0.598**	0.434*	1.000			
Sand	-0.302	0.463*	-0.536**	-0.553**	0.104	-0.638**	-0.017	-0.330	-0.602**	0.158	1.000		
Silt	0.348	-0.474*	0.470*	0.485*	-0.151	0.595**	0.010	0.349	0.567**	-0.175	-0.979**	1.000	
Clay	-0.182	-0.400*	0.738**	0.747**	0.304	0.564**	0.244	0.538**	0.774**	0.244	-0.811**	0.733**	1.000

注: COE: 相关系数; BD: 容重; SOC: 有机碳; TN: 总氮; C/N: 碳氮比; TP: 全磷; K: 有效钾; Fe: 有效铁; Mn: 有效锰; Cu: 有效铜; Zn: 有效锌; Sand: 砂粒; Silt: 粉粒; Clay: 粘粒。 ** 表示在 0.01 水平下相关性显著; * 表示在 0.05 水平下相关性显著。
 Note: COE , correlation coefficiency; TP , total phosphorus; BD , bulk density; SOC , soil organic carbon; TN , total nitrogen; AK , available potassium content; Clay , soil clay content; Silt , soil silt content; Sand , soil sand content; Fe , soil available Fe; Mn , soil available Mn; Cu , soil available Cu; Zn , soil available Zn. ** indicates significant correlations at the 0.01 level , * indicates significant correlations at the 0.05 level.



注: FL: 林地; GL: 草地; VL: 菜地; CL: 常规耕地; PC1: 主成分1; PC2: 主成分2。

Note: FL: forestland; GL: grassland; VL: vegetable land; CL: cropland; PC1: principal component 1; PC2: principal component 2.

图1 不同土地利用方式下土壤理化性质主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of soil physical and chemical properties with different land use patterns

表5 方差分解主成分分析表

Table 5 Variance decomposition principal component analysis table

成分 Component	特征值 Eigen value	方差百分比 Proportion of variance /%	累积 Cumulative proportion of variance /%
1	6.05	46.57	46.57
2	3.30	25.39	71.96
3	1.07	8.23	80.19
4	0.81	6.21	86.40
5	0.64	4.90	91.30
6	0.41	3.16	94.46
7	0.32	2.46	96.92
8	0.17	1.29	98.22
9	0.11	0.84	99.05
10	0.07	0.55	99.60
11	0.04	0.31	99.92
12	0.01	0.08	100.00
13	<0.01	<0.00	100.00

3 讨论

土壤 pH 是表征土壤性质及影响土壤物质循环的重要因子之一^[24], 研究区地处我国华北坝上地区, 土壤均呈现一定的石灰性。土地利用方式对土壤 pH 影响显著, 在长期耕作的菜地和耕地中, 土壤 pH 均呈现下降的趋势, 原因可能是长期的化肥施用导致的土壤酸化^[25], 特别是施肥量较高的菜地, 其表层土壤酸化现象明显, 较下层土壤降低了 0.24 个单位。土壤容重主要受土地利用方式和耕作模式的影响, 容重对植物根系生长具有重要影响^[26]。研究区表层土壤容重无显著差异, 下层土壤中, 草地容重最低 ($1.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 略低于其表层土壤, 这可能是和草地植被的根系分布有关, 在当地较为干旱的气候背景下, 植物根系下扎明显, 根系腐烂后, 会增加土壤孔隙度降低下层土壤土壤容重^[27]。菜地和耕地下层土壤容重较表层增加 18% 和 12%, 其主要原因是长期耕作对犁底层土壤的压实作用。研究表明, 农田犁底层土壤板结会极大影响土壤的水汽渗透和作物根系生长^[18]。因此, 在后期的耕作中应考虑适时深翻, 打破犁底层, 或推行免耕少耕措施, 减少土壤压实。

土壤碳库不仅对固碳减排至关重要, 还对土壤其他理化性质有重要影响^[28]。土地利用方式由林地或草地转变为耕地后, 受翻耕影响, 会加速土壤侵蚀作用和 SOC 的矿化作用, 降低土壤 SOC 含量^[10]。而研究区菜地土壤 SOC 含量显著高于草地、林地和常规耕地, 菜地 SOC 含量分别比草地、林地和耕地高 67%、251% 和 197%, 说明长期有机肥的施用会显著增加土壤 SOC 含量, 提高土壤肥力, 而长期化肥施用, 会对土壤 SOC 造成耗竭^[29]。除了土地利用方式外, 土壤的 SOC 还受土壤粘粒含量影响。本研究发现, SOC 含量与土壤粘粒含量显著正相关, 与 Araujo 等^[30]研究结果一致。因为粘粒中的各种矿物具有较大比表面积, 能够与有机质形成有机-无机复合体或者团聚体进而影响 SOC 的固存^[31-34]。

不同土地利用方式下, 土壤 TN 和 TP 含量均随土层加深而有降低趋势, 这与葛楠楠等^[35]的研究结果一致。4 种土地利用方式下, 菜地土壤 TN 和 TP 含量均最高, 这是因为有机肥的施用不仅能够提高 SOC 的含量, 并且能够向土壤中输入氮、磷等营养元素^[36]。另外, 植被类型也是影响土壤 TN 和 TP 含量的因

素。草地在0~30 cm 土层土壤 TN 和 TP 含量显著高于林地,这与刘志祥等^[37]在缙云山地区的研究结果一致。此外,植物根系的生长、腐解以及根系分泌物的产生都能提高根区土壤磷元素的含量^[16]。与人工林地相比,草地物种丰富度高,植被覆盖度高,草本植物枯死后生物归还量高于林地,为草地土壤提供了碳、氮和磷等营养物质^[38-39]。人工林地植被类型较为单一,地表覆盖程度较差,受风力侵蚀影响,土壤呈裸露状态,枯落物难以原地腐解归还土壤,导致林地土壤氮磷含量较低^[40]。

铁、锰、铜和锌是参与植物生长发育的重要微量元素。本研究中菜地有效铁、锰、铜、锌含量均最高,其次为草地、耕地和林地。其原因主要是菜地每年有大量含有微量元素的有机无机肥施入,从而使得其有效态微量元素含量高于其它3种土地利用类型。菜地中有机肥的施用还增加了土壤有机质的含量,而有机质富含有机酸,能够溶解部分结合态微量元素,从而增加微量元素的有效性^[26 41],本研究中有效铁、锰、铜和锌均与 SOC 呈显著正相关,间接表明了菜地较高的有效态微量元素含量与其高 SOC 含量有关。pH 也是影响土壤微量元素有效性的的重要因素^[42]。本研究中有效锰及有效铁与均土壤 pH 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),且有效锌与土壤 pH 值呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$),这是因为 pH 升高能够促进锰、锌和铜与 SOC 中含氧官能团的结合,从而降低有效态微量元素含量^[35];高 pH 环境下,亚铁离子更易被氧化成三价铁离子,从而使土壤中有效铁的含量降低^[43]。有研究表明,随着耕地种植年限的延长,土壤 pH 值有下降的趋势,并且有效态铜和有效态锌含量不断增加,特别是种植5年以上的菜地,有效态增加速度加快^[40]。本研究除菜地和林地0~15 cm 土层有效锌含量显著高于15~30 cm 土层外,其它土地利用方式不同土层间有效态微量元素含量均没有显著差异性。菜地由于翻土深度较浅以及该地区淋溶水平总体较弱,因此表层具有较高含量有效态锌^[26];林地表层具有较厚的有机质层,其在吸附锌的同时,改善了碱性土壤中碳酸钙的力度,增强了对锌的吸附^[44],因此,0~15 cm 土层土壤有效锌含量显著高于15~30 cm 土层土壤。另外值得注意的是,土壤中的铜和锌是作物可吸收利用的微量元素,同时也是重要的土壤重金属污染物之一,长期施用有机肥提高了土壤有效铜锌含量的同时,也增大了其环境风险。

4 结论

本文以张家口市坝上地区4种土地利用类型为例,研究了土地利用方式对土壤理化性质的影响,研究发现:

(1) 农业用地类型下的菜地和常规耕地,相比人工林地和草地,土壤 pH 均有所降低,下层土壤容重显著增加;与林地、草地和常规耕地相比,菜地土壤长期有机肥施用可显著提高土壤 SOC、TN、TP 及微量元素含量,提高土壤肥力,而只施用化肥的常规耕地肥力出现耗竭,但同时应考虑长期施用有机肥带来的重金属超标等潜在的危害。

(2) 自然草地的 SOC、TN、TP 含量高于人工林地,自然草地土壤除有效铜含量显著高于林地外,两种土地利用方式的微量元素含量并无显著差异。

(3) 林地 SOC 含量、有效锌含量和菜地的有效锌含量在不同土层上差异显著,其他土地利用方式土壤 SOC、TN、TP 和其他有效态微量元素在垂直分布无显著差异。

参考文献 (References):

- [1] DORAN J W, SARRANTONIO M, LIEBIG M A. Soil health and sustainability [M] //Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 1996: 1-54.
- [2] 楚纯洁,周金风,杜越天. 平顶山矿区丘陵坡地土壤健康评价 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (5): 240-243.

- CHUC J, ZHOU J F, DU Y T. Health quality assessment of hilly upland soil around Pingdingshan coal mining area [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46 (5): 240–243.
- [3] HU C J, FU B J, LIU G H, et al. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10 (6): 1082–1091.
- [4] 闫雷, 喇乐鹏, 董天浩, 等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (1): 125–132.
- YAN L, LAY P, DONG T H, et al. Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (1): 125–132.
- [5] LI J W, LIU Y L, HAI X Y, et al. Dynamics of soil microbial C: N: P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133613.
- [6] 钟孝衡. 浅谈植物与微量元素的相关性 [J]. *江西地质科技*, 1994, 21 (3): 16–19.
- ZHONG X H. Talking about the correlation between plants and trace elements [J]. *Jiangxi Geological Science and Technology*, 1994, 21 (3): 16–19.
- [7] 徐焯, 邓艳, 曹建华, 等. 云南小江流域不同土地利用类型土壤微量元素的对比分析 [J]. *中国岩溶*, 2018, 37 (5): 752–760.
- XU Y, DENG Y, CAO J H, et al. Comparative analysis of soil trace elements in different land use types in Xiaojiang River Basin, Yunnan [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37 (5): 752–760.
- [8] YU X, ZHOU W J, CHEN Y P, et al. Spatial variation of soil properties and carbon under different land use types on the Chinese Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134946.
- [9] YANG S Q, ZHAO W W, PEREIRA P. Determinations of environmental factors on interactive soil properties across different land-use types on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140270.
- [10] 王兴灵, 张怡颖, 谷丰, 等. 华北土石山区土地利用类型对土壤有效态微量元素的影响 [J]. *草业科学*, 2020, 37 (7): 1272–1280.
- WANG X L, ZHANG Y Y, GU F, et al. Effects of land use type on soil available trace elements in the rocky mountain area of North China [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37 (7): 1272–1280.
- [11] LIU J S, DAI J, WANG Z H, et al. Effects of fallow or planting wheat (*Triticum aestivum* L.) and fertilizing P or fertilizing P and N practices on soil carbon and nitrogen in a low-organic-matter soil [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62 (3): 263–270.
- [12] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 施用不同畜禽粪便土壤剖面中重金属分布特征 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31 (12): 1708–1714.
- YE B X, LIU Y, YU J P, et al. Characteristics of the distribution of heavy metals in the profiles of the soils fertilized with different livestock manures [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31 (12): 1708–1714.
- [13] 杨艳芳, 邵婷, 吕梦宇, 等. 龙窝湖湿地不同土地利用方式土壤养分和重金属污染特征 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33 (5): 1312–1318.
- YANG Y F, SHAO T, LÜ M Y, et al. Characteristics of soil nutrients and heavy metal pollution in wetlands under different land use patterns in Longwo Lake of Wuhu City, Anhui Province, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33 (5): 1312–1318.
- [14] 张秀, 张黎明, 龙军, 等. 亚热带耕地土壤酸化程度差异及影响因素 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (3): 441–450.
- ZHANG X, ZHANG L M, LONG J, et al. Soil acidification degree difference and impact factors of subtropical cropland [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (3): 441–450.
- [15] 娄义宝, 史东梅, 江娜, 等. 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响 [J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1399–1410.
- LOU Y B, SHI D M, JIANG N, et al. Effects of soil erosion on soil moisture and infiltration characteristics of slope farmland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1399–1410.
- [16] STEINBEISS S, BEBLER H, ENGELS C, et al. Plant diversity positively affects short-term soil carbon storage in experimental grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14 (12): 2937–2949. [LinkOut]

- [17] TOSI M, CORREA O S, SORIA M A, et al. Land - use change affects the functionality of soil microbial communities: a chronosequence approach in the Argentinian Yungas [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 118 - 127.
- [18] QI Y B, CHEN T, PU J, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land [J]. *CATENA*, 2018, 160: 339 - 344.
- [19] 李恋卿, 郑金伟, 潘根兴, 等. 太湖地区不同土地利用影响下水稻土重金属有效性库变化 [J]. *环境科学*, 2003, 24 (3): 101 - 104.
- LI L Q, ZHENG J W, PAN G X, et al. Change of available pool of heavy metals in paddy soils under human land use impacts from the Taihu-lake region, Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Science*, 2003, 24 (3): 101 - 104.
- [20] 蔡国柱. 张家口地区风沙侵蚀危害及防护林骨干工程的配置 [J]. *林业资源管理*, 1987 (2): 63 - 66.
- CAI G Z. Sand erosion hazards in Zhangjiakou area and the configuration of key protection forest projects [J]. *Forest Resources Management*, 1987 (2): 63 - 66.
- [21] 杨越, 杨依天, 武智勇, 等. 冀北坝上地区农田防护林防风固沙效应研究 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35 (4): 167 - 172.
- YANG Y, YANG Y T, WU Z Y, et al. Studies on wind break and sand fixation effects of farmland shelterbelt in Bashang area of northern Hebei [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35 (4): 167 - 172.
- [22] 黄绍琳, 鲁春霞, 刘一江. 张家口市高耗水农作物种植结构及需水量时空格局变化 [J]. *草业科学*, 2020, 37 (7): 1293 - 1301.
- HUANG S L, LU C X, LIU Y J. Spatio-temporal patterns of crop planting structure and water requirement in the Zhangjiakou region, northern China [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37 (7): 1293 - 1301.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 25 - 151.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 25 - 151.
- [24] RUMPEL C, CRÈME A, NGO P T, et al. The impact of grassland management on biogeochemical cycles involving carbon, nitrogen and phosphorus [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 15 (2): 353 - 371.
- [25] LIANG Q, CHEN H Q, GONG Y S, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat - maize system in the North China Plain [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92 (1): 21 - 33.
- [26] RÓZEK K, ROLA K, BŁASZKOWSKI J, et al. Associations of root - inhabiting fungi with herbaceous plant species of temperate forests in relation to soil chemical properties [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1573 - 1579.
- [27] GARCÍA - FAYOS P, BOCHET E. Indication of antagonistic interaction between climate change and erosion on plant species richness and soil properties in semiarid Mediterranean ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (2): 306 - 318.
- [28] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales [J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149 - 162.
- [29] MONTGOMERY D R. Soil erosion and agricultural sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104 (33): 13268 - 13272.
- [30] ARAUJO M A, ZINN Y L, LAL R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands [J]. *Geoderma*, 2017, 300: 1 - 10.
- [31] KIEM R, KNICKER H, KÖGEL - KNABNER I. Refractory organic carbon in particle - size fractions of arable soils I: distribution of refractory carbon between the size fractions [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33 (12): 1683 - 1697.
- [32] SAGGAR S, PARSHOTAM A, SPARLING G P, et al. ¹⁴C - labelled ryegrass turnover and residence times in soils varying in clay content and mineralogy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28 (12): 1677 - 1686.
- [33] KAISER K, GUGGENBERGER G. Mineral surfaces and soil organic matter [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54 (2): 219 - 236.
- [34] ZINN Y L, LAL R, BIGHAM J M, et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian cerrado: texture and mineralogy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71 (4): 1204 - 1214.
- [35] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (5): 1626 - 1632.

- GE N N, SHI Y, YANG X L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (5): 1626-1632.
- [36] LETTENS S, VAN ORSHOVEN J, VAN WESEMAEL B, et al. Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data sets for 1990 and 2000 [J]. *Geoderma*, 2005, 127 (1/2): 11-23.
- [37] 刘志祥, 江长胜, 祝滔. 缙云山不同土地利用方式对土壤全磷和有效磷的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35 (3): 140-145.
- LIU Z X, JIANG C S, ZHU T. Effects of different land use patterns on soil total phosphorus and available phosphorus in Jinyun mountain [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35 (3): 140-145.
- [38] 陈玉平, 吴佳斌, 张曼, 等. 枯落物处理对森林土壤碳氮转化过程影响研究综述 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2012, 7 (2): 84-94.
- CHEN Y P, WU J B, ZHANG M, et al. Research advances of effects of detritus input and removal on dynamics of carbon and nitrogen in forest soils [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2012, 7 (2): 84-94.
- [39] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究——含量与分布规律 [J]. *生态学杂志*, 1997 (6): 18-22.
- RUAN H H, JIANG Z L, GAO S M. Preliminary studies of carbon cycling in three types of forests in the hilly regions of southern Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16 (6): 18-22.
- [40] 王慧, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (5): 995-1000.
- WANG H, GUO Y F, YAO Y F, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patterns [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33 (5): 995-1000.
- [41] KELEPERTZIS E, PARASKEVOPOULOU V, ARGYRAKI A, et al. Evaluation of single extraction procedures for the assessment of heavy metal extractability in *Citrus* agricultural soil of a typical Mediterranean environment (Argolida, Greece) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (11): 2265-2275.
- [42] 陈超, 杨丰, 赵丽丽, 等. 贵州省不同土地利用方式对土壤理化性质及其有效性的影响 [J]. *草地学报*, 2014, 22 (5): 1007-1013.
- CHEN C, YANG F, ZHAO L L, et al. Influences of different land use types on soil characteristics and availability in Karst area, Guizhou Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22 (5): 1007-1013.
- [43] 曾路生. 寿光设施蔬菜土壤有效态 Hg、As、Cu 和 Zn 含量的变化 [J]. *环境化学*, 2013, 32 (9): 1743-1748.
- ZENG L S. Available Hg, As, Cu and Zn content in vegetable greenhouse soil of Shouguang [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32 (9): 1743-1748.
- [44] 高美荣, 朱波, 蒋明富, 等. 不同利用方式下石灰性紫色土的锌形态剖面分布特征初探 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (2): 201-204.
- GAO M R, ZHU B, JIANG M F, et al. Profile distribution of zinc forms under calcareous purple soil under different land use [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (2): 201-204.