

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0047

冉敏, 宋靛颖, 薛晶玲, 等. 成都平原成土母质和农地利用方式对土壤剖面氮素分布的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(3): 398-407.

RAN Min, SONG Liang-ying, XUE Jing-ling, et al. Effects of Soil Parent Material and Farmland Utilization on Nitrogen Distribution in Soil Profile in Chengdu Plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(3): 398-407.

## 成都平原成土母质和农地利用方式对土壤剖面氮素分布的影响

冉敏, 宋靛颖, 薛晶玲, 张元媛, 张浩, 吴德勇, 李启权<sup>①</sup> (四川农业大学资源学院, 四川成都 611130)

**摘要:** 揭示农地土壤剖面氮素分布特征及其影响因素有助于区域氮肥管理和氮素面源污染防治。基于 173 个土壤剖面的 1 356 个采样数据, 运用地统计学和方差分析方法, 分析成都平原农地土壤剖面氮素空间变异特征, 探讨农地利用方式和成土母质对土壤氮素剖面分布的影响。结果表明, 在垂直方向上, 0~100 cm 土层全氮和碱解氮含量随土壤深度增加从 1.91 g·kg<sup>-1</sup> 和 138.48 mg·kg<sup>-1</sup> 分别显著降低至 0.55 g·kg<sup>-1</sup> 和 25.39 mg·kg<sup>-1</sup>。在水平空间上, 各土层全氮和碱解氮含量空间分布格局一致, 总体呈现出由中部向东北部和西南部递增的趋势。稻-蔬轮作地和稻-麦/油轮作地各土层全氮和碱解氮含量之间均无显著差异, 而园林地表层(0~20 cm)土壤全氮和碱解氮含量较稻-麦/油轮作地和稻-蔬轮作地 2 种方式低 11.23%~15.78% ( $P<0.05$ )。就不同母质类型而言, 与 Q4 灰色冲积物发育土壤相比, Q3 老冲积物发育土壤 0~40 cm 土层全氮和碱解氮含量为其 1.12~1.19 倍 ( $P<0.05$ ), 而 >60~100 cm 土层全氮含量仅为其 0.89 倍 ( $P<0.05$ ); Q4 灰棕色冲积物发育土壤 0~40 cm 土层全氮和碱解氮含量为其 1.14~1.21 倍 ( $P<0.05$ )。不同农地利用方式在 Q3 老冲积物发育土壤上 4 个土层全氮和碱解氮含量均无显著差别 ( $P>0.05$ )。园林地的 Q4 灰色冲积物和 Q4 灰棕冲积物发育表层土壤全氮和碱解氮含量低于其他 2 种用地方式, 而 >20~40 cm 土层土壤整体高于其他 2 种用地方式。以上结果说明土壤氮素剖面分布特征受农地利用方式的影响, 且这种影响与土壤母质类型有关。

**关键词:** 土壤氮素; 土壤剖面; 空间分布; 农地利用方式; 成土母质

**中图分类号:** X825; S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2024)03-0398-10

**Effects of Soil Parent Material and Farmland Utilization on Nitrogen Distribution in Soil Profile in Chengdu Plain.** RAN Min, SONG Liang-ying, XUE Jing-ling, ZHANG Yuan-yuan, ZHANG Hao, WU De-yong, LI Qi-quan<sup>①</sup> (College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** Understanding the profile distribution characteristics of soil nitrogen and its influencing factors in the farmland is essential for regional nitrogen fertilizer management and control of non-point source nitrogen pollution. Based on 1 356 samples from 173 soil profiles on the Chengdu Plain, this study analyzed the spatial variation characteristics of soil nitrogen in farmland soil profile using geostatistics and variance analysis and identified the effects of agricultural land use types and soil parent materials on the nitrogen distribution in soil profile. The results show that the contents of total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) decreased significantly from 1.91 g·kg<sup>-1</sup> and 138.48 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.55 g·kg<sup>-1</sup> and 25.39 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, in the 0-100 cm soil layer with the increase in soil depth. Spatially, the contents of TN and AN in each soil layer had a similar spatial distribution pattern, which showed an increasing trend from the central to the northeast and southwest. There was no significant difference in the contents of TN and AN of each soil layer between rice-vegetable rotation land and rice-wheat/rapeseed rotation land, while the contents of TN and AN in the surface layer (0-20 cm) of afforested land were 11.23%-15.78% lower than those of the other two land uses ( $P<0.05$ ). Compared with soils formed from Q4 gray alluvium, soils formed from Q3 old alluvium had 1.12-1.19 times of TN and AN content in 0-40 cm

收稿日期: 2023-01-31

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0104)

①通信作者 E-mail: liqq@reis.ac.cn

soil layer ( $P < 0.05$ ) and 0.89 times of TN content in  $>60-100$  cm soil layer ( $P < 0.05$ ), while the contents of TN and AN in the 0-40 cm soil layer of soils formed from Q4 gray-brown alluvium were 1.14-1.21 times as those in the Q4 gray alluvium ( $P < 0.05$ ). There were no significant differences in the contents of TN and AN under different land uses in each layer of Q3 old alluvium developed soil ( $P > 0.05$ ). For afforested land, soils formed from Q4 grey alluvium and Q4 grey-brown alluvium in afforested land had lower TN and AN content in the topsoil than the other two land use types, but had higher TN and AN content below the  $>20-40$  cm soil layer. The above results suggest that the profile distribution characteristics of soil nitrogen are affected by agricultural land use types and such effects are controlled by soil parent material.

**Key words:** soil nitrogen; soil profile; spatial distribution; agricultural land use mode; soil parent material

氮是植物生长发育所必需的营养元素<sup>[1]</sup>,不仅对土壤肥力的建立和植物生产力的提高起着关键作用<sup>[2]</sup>,同时还调控着陆地生态系统的结构和功能<sup>[3]</sup>。在自然因素和人类活动的综合影响下,区域土壤氮素在水平和垂直方向上存在明显的空间变异<sup>[4-5]</sup>。长期以来,为了提高作物产量,我国农业生产中大量施用氮肥<sup>[6]</sup>。然而,由于氮素在土壤中的迁移性较强,过量施用氮肥,势必改变土壤氮素空间分布格局<sup>[7]</sup>,并且会降低氮素利用率<sup>[8]</sup>,造成严重面源污染问题<sup>[9]</sup>的同时,影响土壤碳氮循环<sup>[10]</sup>。因此,了解土壤剖面氮素的空间分布特征及其影响因素,对土壤养分精准管理、面源污染防控和生态系统碳氮循环研究具有重要意义。

土壤氮素的空间异质性主要受成土母质、土地利用类型和耕作管理措施等内在和外在因素的共同影响<sup>[11-13]</sup>,且不同区域土壤氮素的空间分布及其主控因子存在明显差异<sup>[14-15]</sup>。其中,不同土地利用方式带来的不同耕作方式、种植制度以及施肥措施均会直接影响土壤氮素输入和输出<sup>[1,16]</sup>。近年来,在快速的人口增长和经济发展背景下,农产品需求的急剧增加导致土地利用方式迅速变化,大量传统农业用地方式转变为其他农业用地方式<sup>[17]</sup>,如为满足城市人口对蔬菜不断增长的需求,水稻-小麦/油菜双季种植地转变为连作蔬菜地,这种农地利用方式的变化影响了各种土壤元素在土壤中的迁移和转化,造成相关土壤性质发生显著改变<sup>[18]</sup>,增强了土壤性质空间变异性<sup>[1]</sup>;并且由此产生的施肥强度增加,加剧了农业非点源污染<sup>[19]</sup>。此外,成土母质决定着土壤的形成和演化<sup>[15]</sup>,不同母质形成的土壤通常具有不同理化性质,从而影响土壤氮素的积累和淋失<sup>[20]</sup>。当前,许多学者在不同尺度上对不同区域土壤氮素的空间分布格局及其影响因素进行大量研究,但这些研究大多集中于表层土壤<sup>[21-23]</sup>。然而,已有研究证明在土壤垂直剖面上氮素含量及其影响因素会随深度的增加而变化<sup>[24]</sup>,且不同因素之间存在交互效应<sup>[25]</sup>。因此,揭示土地利用方式及其与母质联合对土壤剖面氮素分布的影响将有助于

高度集约利用条件下农地氮肥合理利用及氮素流失风险评估。

成都平原是我国西南地区重要的粮、油生产基地<sup>[19]</sup>,随着城市化进程加快,该地区农业利用集约化程度不断提高,农地利用方式和强度发生明显改变<sup>[26]</sup>。大量传统稻-麦/油轮作地转变为稻-蔬轮作地和园林地,对土壤性质产生剧烈影响<sup>[27]</sup>。目前,已有报道分析该地区土壤氮素水平空间分布特征,但由于采样难度和成本等原因,研究主要集中在耕层土壤<sup>[28-29]</sup>,土壤剖面氮素分布信息较少,且农地利用方式对土壤氮素分布的影响及其与成土母质的关系尚不明确。因此,该研究以成都平原为案例区,分层采集0~100 cm深度剖面土样,分析该区域土壤氮素在水平和垂直方向上的分布规律,探究农地利用方式和成土母质类型以及两者交互作用对土壤剖面氮素分布的影响,以为该区域土壤精准施肥、农业可持续发展和生态环境保护建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

研究区为成都平原核心区,地处 $30^{\circ}22' N \sim 31^{\circ}05' N$ 、 $103^{\circ}27' E \sim 104^{\circ}14' E$ ,区域总面积约为 $3\ 173\ \text{km}^2$ ,包括温江区、郫都区、新都区、青白江区、崇州市、大邑县、新津县、双流县、都江堰市和彭州市(图1)。区域自然条件优越,地势平坦,由西北向东南缓慢倾斜,海拔介于 $447 \sim 732\ \text{m}$ 之间;水资源丰富,分布有金马河、西河和斜江河等河流。该区属于亚热带季风气候区,年平均气温为 $16\ ^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 $900 \sim 1\ 300\ \text{mm}$ ,温暖湿润,雨热同期。区域土壤类型主要为水稻土。成土母质主要包括第四纪全新世时期灰色冲积物(Q4灰色冲积物)和灰棕冲积物(Q4灰棕冲积物)以及第四纪更新世时期老冲积物(Q3老冲积物)。其中,灰色和灰棕冲积物黏粒含量和容重相对较低,渗透性较好;更新统老冲积物风化程度更深,砂粒含量较低,质地黏重<sup>[30-31]</sup>。自2000年以来,随着该区域城镇化水平不断提高和农

业结构调整,为了满足城市人口蔬菜需求以及城市建设绿化树木需求,区域内稻-蔬轮作地和园林地面积大幅增加,形成以稻-麦/油轮作地为主,以稻-蔬轮作地和园林地(园林和果园)等为辅的多种农业用地方式<sup>[31]</sup>。与此同时,高度集约的土地利用和大量的肥料投入导致如非点源污染、重金属污染等严重土壤环境问题<sup>[32]</sup>。

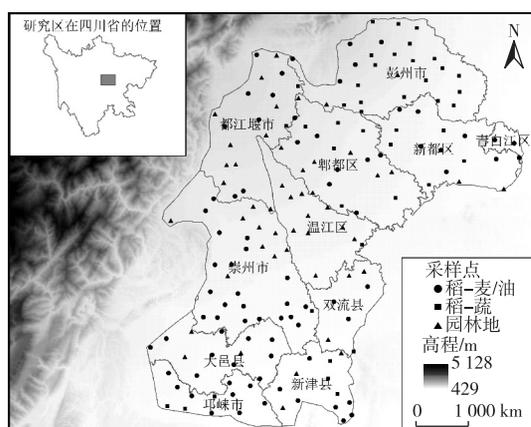


图1 研究区位置及样点分布

Fig. 1 Location of study area and the spatial distribution of soil sampling sites

## 1.2 样品采集与处理

2016—2017年,根据成都平原Q4灰色冲积物、Q4灰棕冲积物和Q3老冲积物3种主要成土母质类型,稻-麦/油轮作地、稻-蔬轮作地和园林地3种典型农地利用方式以及道路、水系等空间分布基础信息,兼顾空间分布均匀性和样点代表性原则,采用3 km×3 km的网格法进行野外采样。其中,稻-蔬轮作地和园林地至少利用10 a以上。参照成都市第二次土壤普查资料中土壤发生层分类,在每个1 m×1 m样点土坑的3个侧面按照0~20、>20~40、>40~60和>60~100 cm土层分别收集土壤剖面样

本。将每层3个侧面土样混合后,采用四分法取样1 kg左右。采样过程中,利用GPS获取每个剖面地理坐标和高程信息,并详细记录每个点位的地名、成土母质、土壤类型和耕作管理等环境信息。土壤样品在室内经过自然风干、去杂、碾磨后,分别过2和0.149 mm孔径尼龙筛。土壤全氮(TN)和碱解氮(AN)含量分别采用凯氏定氮法和碱解扩散法进行测定。测定时,为了确保数据准确性,采用3次重复和国家标准物质进行数据质控。

## 1.3 数据处理

采用阈值法即均值加减3倍标准差,在不同类型下识别并剔除异常值,最后实际用于分析的剖面点位共有173个,4个土层样品数分别为173、173、170和162个。采用SPSS 22.0完成数据描述性统计分析、K-S检验、方差分析和回归分析。采用K-S检验对不同深度土层全氮和碱解氮含量进行正态性检验,将不符合正态分布的数据进行对数转化,使其满足数据处理条件。采用方差分析探究各影响因素对区域内土壤氮素的作用。采用GS+ 9.0进行半方差模型拟合以及相关参数确定,将最优模型及参数带入ArcGIS 10.2并采用普通克里格法进行空间插值,绘制研究区土壤全氮及碱解氮含量空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤氮素含量统计特征

如表1所示,0~100 cm土层全氮和碱解氮含量均值分别为0.55~1.91 g·kg<sup>-1</sup>和25.39~138.48 mg·kg<sup>-1</sup>,沿剖面土层深度显著下降,且降低幅度随深度增加而减小。根据全国第二次土壤普查的肥力分级标准,表层(0~20 cm)土壤全氮和碱解氮含量均值处于丰富水平。

表1 土壤剖面氮素描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of nitrogen content in soil profile

土层深度/ cm	样本数	全氮(TN)			碱解氮(AN)		
		均值±标准差/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	占剖面 比例/%	均值±标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	占剖面 比例/%
0~20	173	1.91±0.45 <sup>A</sup>	23.56	46.70	138.48±35.48 <sup>A</sup>	25.62	54.55
>20~40	173	0.99±0.31 <sup>B</sup>	31.31	24.21	58.88±23.18 <sup>B</sup>	39.37	23.20
>40~60	170	0.64±0.22 <sup>C</sup>	34.38	15.65	31.09±15.17 <sup>C</sup>	48.79	12.25
>60~100	162	0.55±0.17 <sup>D</sup>	30.91	13.45	25.39±11.12 <sup>D</sup>	43.80	10.00

同一列数据后英文大写字母不同表示不同土层间某指标差异显著( $P<0.05$ )。

土壤氮素含量分布主要集中在深度≤40 cm土层,其中,0~40 cm土壤全氮含量占整个剖面全氮含

量的70.91%,碱解氮含量占整个剖面碱解氮含量的77.75%。从变异系数上来看,各层土壤全氮含量变异系数为23.56%~34.38%,碱解氮含量变异系数为25.62%~48.79%,均属于中等程度空间变异。总体而言,土壤氮素空间异质性随土壤深度增加而增强,且各土层碱解氮含量空间变异系数均高于全氮。

## 2.2 土壤剖面全氮和碱解氮含量空间结构特征

在常规数据统计分析基础上,采用GS+ 9.0对成都平原区土壤剖面全氮和碱解氮含量进行半方差分析,描述空间分布的随机性和结构性特征,并根据决定系数( $R^2$ )最大、残差(RSS)最小的原则确定最优函数理论模型及其参数。结果(表2)显示,在垂直分布方向上,0~20、>20~40、>40~60和>60~100 cm土壤全氮含量分别符合指数、指数、高斯和指数模型,土壤碱解氮含量分别符合指数、指

数、指数和球状模型。从 $R^2$ 来看, $R^2$ 在0.61~0.88之间,表明各土层全氮和碱解氮含量理论模型拟合效果均较好。从块金效应来看,0~60 cm各土层全氮和碱解氮含量块金系数在25%~75%之间,属于中等程度空间变异,其空间异质性受成土母质、地形和地貌等结构性因素以及土地利用方式和施肥管理等随机性因素的共同影响。下层(>60~100 cm)土壤全氮和碱解氮含量块金系数分别为11.89%和20.55%,均小于25%,表明研究区该层土壤全氮和碱解氮含量具有强烈空间自相关性,其空间变异主要受结构性因素影响。各土层碱解氮含量块金系数均大于全氮,表明相较于全氮而言,碱解氮更倾向于受随机性因素影响。随着土层深度增加,全氮和碱解氮含量块金系数以及空间自相关范围逐渐减小。

表2 研究区土壤剖面氮素半方差函数模型及其相关参数

Table 2 The semi-variogram and corresponding parameters of nitrogen contents in the soil profile

指标	土层深度/cm	模型	块金值	基台值	块基比	变程	决定系数	残差
全氮	0~20	指数	0.028	0.057	49.91	25.23	0.88	8.71E-05
	>20~40	指数	0.031	0.092	33.70	5.52	0.74	1.69E-04
	>40~60	高斯	0.023	0.077	29.87	4.49	0.86	2.32E-04
	>60~100	指数	0.010	0.086	11.89	4.20	0.65	1.23E-04
碱解氮	0~20	指数	770	1 150	66.96	12.50	0.82	15 059
	>20~40	指数	0.058	0.165	35.15	6.85	0.70	4.05E-04
	>40~60	指数	0.042	0.138	30.43	5.40	0.72	6.18E-04
	>60~100	球状	0.030	0.146	20.55	3.92	0.61	1.30E-03

## 2.3 土壤全氮和碱解氮空间分布特征

研究区土壤剖面氮素含量空间分布格局见图2。如图2所示,总体而言,研究区土壤全氮和碱解氮含量空间变异特征较为相似,均呈现出由中部向东北部和西南部递增的趋势,且两者均随土壤深度的增加而逐渐降低。根据第二次全国土壤普查氮素含量分级标准,研究区表层土壤全氮和碱解氮含量整体处于丰富水平。其中,表层土壤全氮含量高值区( $>2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )主要分布在东北部彭州市和新都区交界处以及西南部崇州市、大邑县和邛崃市,低值区( $\leq 1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )主要分布在中部温江区和崇州市交界处以及郫县和温江交界处。下层土壤全氮含量显著降低,其相对高值区和相对低值区与表层高值区和低值区分布较为一致。土壤碱解氮表层高值区( $>150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )与全氮表层高值区分布相似;低值区( $\leq 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )主要分布在郫县、温江区和都江堰市交界处以及温江区、双流县和崇州市交界处,部分分布在新津县。下层土壤碱

解氮含量相对高值区和低值区分布与表层土壤相似。

## 2.4 土壤全氮和碱解氮含量影响因素

### 2.4.1 不同农地利用方式土壤剖面氮素分布特征

研究区3种农地利用方式土壤剖面氮素含量统计差异见图3。如图3所示,从土壤剖面垂直方向上来看,相同农地利用方式各土层全氮和碱解氮含量与土层深度均呈负相关。各农地利用方式0~60 cm土层全氮和碱解氮含量随土壤深度增加而显著下降。从不同用地类型上来看,园林地0~20 cm土层全氮和碱解氮含量较稻-麦/油轮作地分别降低15.78%和11.23% ( $P<0.05$ ),较稻-蔬轮作地分别降低15.09%和14.38% ( $P<0.05$ )。3种农地利用方式下层土壤氮素含量之间均无显著差异。这表明土壤剖面氮素含量分布与农地利用方式有关,稻-麦/油轮作地与稻-蔬轮作地间各土层氮素含量无明显差别,而园林地表层土壤全氮和碱解氮含量显著低于其他2种用地方式。

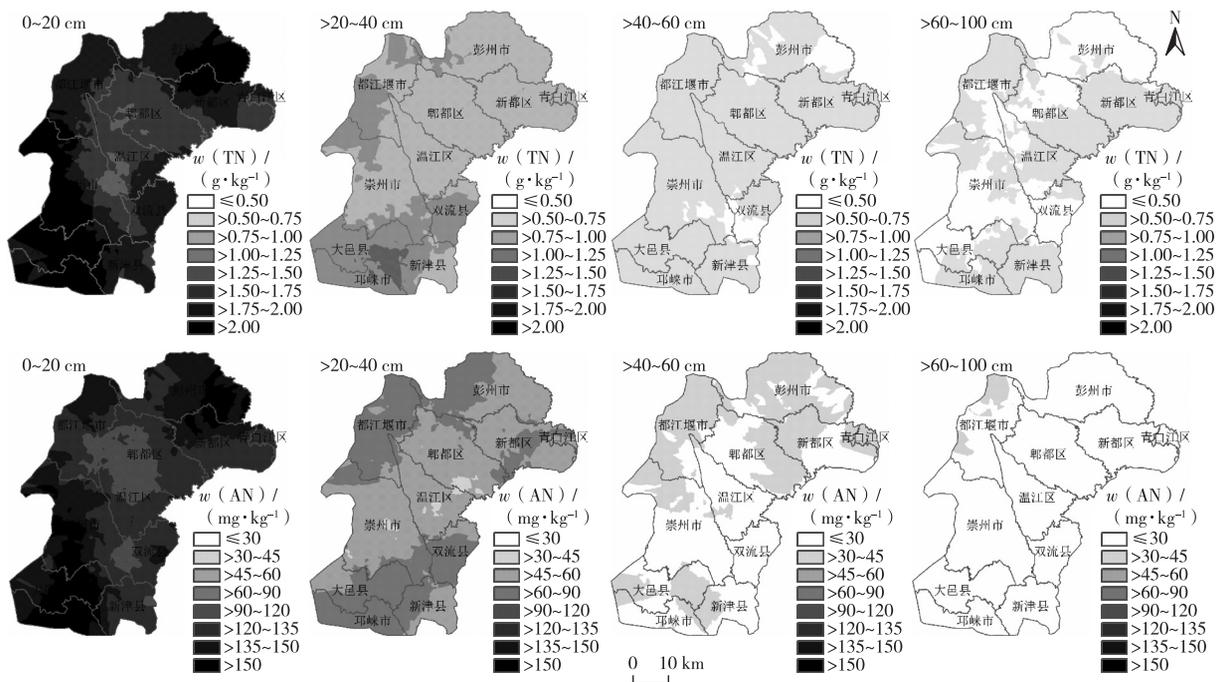
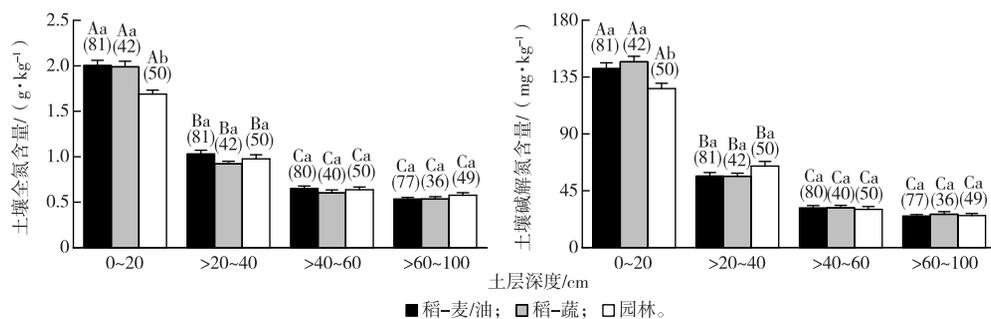


图 2 研究区土壤剖面氮素含量空间分布

Fig. 2 Spatial patterns of nitrogen contents in the soil profile



同一幅图中, 直方柱上方英文大写字母不同表示同一农地利用方式不同土层间土壤某氮素含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); 英文小写字母不同表示同一土层不同农地利用方式间土壤某氮素含量差异显著 ( $P < 0.05$ )。直方柱上方括号内数字为样本数。

图 3 不同农地利用方式土壤剖面氮素分布特征

Fig. 3 Nitrogen contents of soil profiles for different land-use patterns

2.4.2 不同成土母质发育土壤剖面氮素分布特征

研究区 3 种成土母质发育土壤剖面氮素含量 (图 4) 存在差异。各母质类型发育土壤氮素含量均随土壤深度增加而逐渐减小, 表层土壤全氮和碱解氮含量均显著高于下层土壤, >20~40 cm 土层显著高于>40~60 cm 土层, 而>40 cm 以下土层之间无显著差异。从不同母质类型来看, Q3 老冲积物发育土壤 0~20 cm 土层全氮和碱解氮含量分别为 Q4 灰色冲积物发育土壤的 1.19 和 1.17 倍 ( $P < 0.05$ ), >20~40 cm 土层分别为 1.12 和 1.16 倍 ( $P < 0.05$ ), 而>60~100 cm 土层全氮含量仅为 0.89 倍 ( $P < 0.05$ )。Q4 灰棕色冲积物发育土壤 0~20 cm 土层全氮和碱解氮含量均为 Q4 灰色冲积物发育土壤的

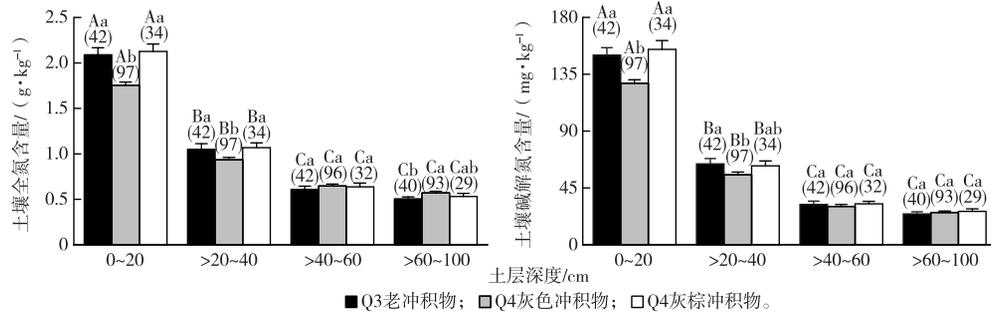
1.21 倍 ( $P < 0.05$ ), >20~40 cm 土层全氮含量为 1.14 倍 ( $P < 0.05$ )。Q3 老冲积物和 Q4 灰棕冲积物发育土壤各土层全氮和碱解氮含量均无显著差别。结果表明, 土壤剖面氮素分布特征受成土母质类型影响。

2.4.3 不同母质类型各农地利用方式土壤氮素含量变化特征

研究区 3 种母质类型上不同农地利用方式土壤剖面氮素含量统计特征见图 5。在 Q3 老冲积物发育土壤上, 不同农地利用方式下 4 个层次土壤全氮和碱解氮含量均无显著差别 ( $P > 0.05$ )。与稻-麦/油轮作地相比, 园林地 Q4 灰棕冲积物发育表层土壤全氮和碱解氮含量分别降低 28.88% 和 27.71%

( $P < 0.05$ ),  $>20 \sim 40$  cm 土层碱解氮含量则提高 55.82% ( $P < 0.05$ ); 与稻-蔬轮作地相比, 园林地 Q4 灰棕冲积物发育表层土壤全氮含量低 25.40% ( $P < 0.05$ ),  $>20 \sim 40$  cm 土层全氮和碱解氮含量则提高 43.53% 和 44.97% ( $P < 0.05$ )。稻-蔬轮作地与稻-麦/油轮作地之间各土层氮素含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。与稻-麦/油轮作地相比, 园林地 Q4 灰色冲积物发育表层土壤全氮含量降低 9.49% ( $P < 0.05$ ),

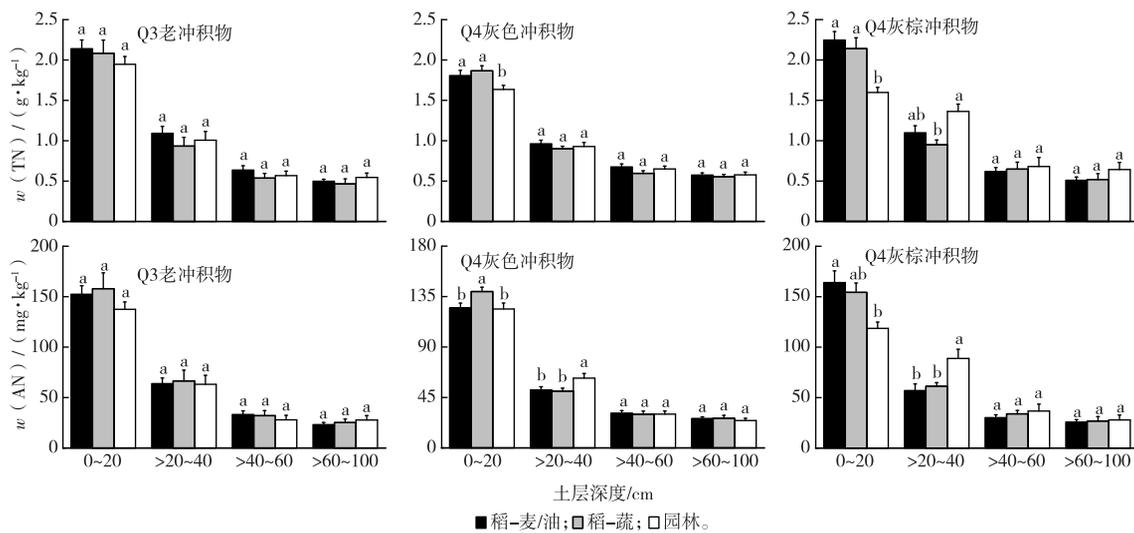
$>20 \sim 40$  cm 土层碱解氮含量则提高 20.90% ( $P < 0.05$ ); 与稻-蔬轮作地相比, 园林地表层全氮和碱解氮含量分别降低 12.33% 和 11.18% ( $P < 0.05$ ),  $>20 \sim 40$  cm 土层碱解氮含量则提高 23.05% ( $P < 0.05$ )。稻-蔬轮作地表层土壤碱解氮含量较稻-麦/油轮作地高 11.63% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 农地利用方式对于土壤剖面氮素含量的影响受控于成土母质类型。



同一幅图中, 直方柱上方英文大写字母不同表示同一母质不同土层间土壤某氮素含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); 英文小写字母不同表示同一土层不同母质间土壤某氮素含量差异显著 ( $P < 0.05$ )。直方柱上方括号内数字为样本数。

图 4 不同母质发育土壤各土层剖面氮素含量分布特征

Fig. 4 Nitrogen contents of soil profiles for different parent materials



同一幅图中, 直方柱上方英文小写字母不同表示相同母质发育土壤上同一土层氮素含量在不同农地利用方式之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 不同母质各农地利用方式土壤氮素剖面分布特征

Fig. 5 Profile distribution of nitrogen contents of three parent materials formed soils in different agricultural land-use types

### 3 讨论

#### 3.1 成都平原区农地土壤剖面分布特征

研究区土壤表层氮素含量均处于较丰富水平, 其中, 全氮含量为  $1.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与我国东部农田土壤全氮含量接近<sup>[25]</sup>, 是滦河流域坡耕地的 2 倍多<sup>[33]</sup>; 表层碱解氮含量为  $138.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与江西

省耕地土壤碱解氮含量相近<sup>[34]</sup>。成都平原区各层土壤全氮和碱解氮的空间分布格局相似, 均呈现出由中部向西南和东北递增的趋势, 相对低值区主要分布在温江-郫县一带, 其他区域有零散分布, 这与陈青松等<sup>[35]</sup>和陈肖等<sup>[36]</sup>的研究结果相似。自 1990 年代以来, 温江-郫县一带大面积由传统稻-麦/油轮作地改为苗圃, 施肥量明显降低<sup>[16]</sup>。此外, 该区

域土壤母质来源主要是 Q4 灰色冲积物,土壤颗粒较粗,渗透性较强,养分易随水流失<sup>[17]</sup>,因此氮素含量相对较低。研究区氮素含量相对高值区主要分布在东北部彭州市与新都区交界处以及西南部崇州市、大邑县和邛崃市。这是由于该区域多为稻-麦/油轮作地和稻-蔬轮作地,化肥施用量大,且土壤母质主要为 Q4 灰棕冲积物和 Q3 老冲积物,土质较细,渗透性较弱,养分保持能力相对更高<sup>[31]</sup>。成都平原区农地土壤氮素含量沿剖面显著降低,呈现出明显的表聚现象,这与其他研究结果<sup>[12,37]</sup>一致。受植物凋落物、人类活动氮排放和大气氮沉降等随机性和结构性因素的影响,使得越接近地表的土壤有越多的氮输入<sup>[38]</sup>,因此表层土壤氮素含量相对较高。然而,表征土壤孔隙度的土壤容重影响土壤氮素迁移<sup>[24]</sup>。成都平原长期采用机耕,导致表层土壤被不断压实,且显著高于肥沃土壤的一般容重,阻止氮素进入深层土壤<sup>[32]</sup>。同时,成都平原为都江堰灌溉系统自流灌溉区,表层土壤硝态氮易随水流失<sup>[39]</sup>。由此,随土层深度增加,氮素空间分布主要受成土母质等结构性因素影响,土壤外来氮源逐渐减少<sup>[33]</sup>,全氮和碱解氮含量随之下降。

### 3.2 农地利用方式和成土母质的交互影响

不同农地利用方式下,进入土壤的肥料和植物凋落物的数量和性质以及耕作方式、水分管理等方面存在差异,进而影响土壤氮素空间分布。已有研究<sup>[40]</sup>表明,为缩短蔬菜生长周期和提高作物品质以及降低劳动力成本,研究区稻-蔬轮作地施氮量高于 300 kg·hm<sup>-2</sup>,远高于稻-麦/油轮作地。但稻-蔬轮作地与稻-麦/油轮作地间各土层全氮和碱解氮含量差异不大,这与研究区域其他研究结果<sup>[16,41]</sup>相似。这主要与肥料种类、施氮量、大气氮沉降和耕作管理等因素有关。首先,成都平原区肥料投入以化肥为主,有机肥施用水平较低<sup>[42]</sup>,会抑制矿质氮向有机氮的转化,不利于氮素积累<sup>[25]</sup>。其次,施用氮肥在短期内可以增加农田土壤氮素含量,但持续增加施氮量会显著提高土壤氮素矿化和硝化速率,促进土壤氮素流失<sup>[1,3,9]</sup>。再次,大气氮沉降是补偿农田生态系统氮素损失的重要途径<sup>[43]</sup>。成都平原是全国大气酸沉降最严重的地区之一,每年氮沉降量超过 30 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[39]</sup>,在一定程度上缩小了 2 种用地方式之间氮输入量的差距。此外,蔬菜栽培中频繁的翻耕容易破坏土壤团聚体结构和提高土壤透气性,加剧土壤侵蚀,增强微生物活动,导致有机碳含量减少<sup>[25]</sup>。在上述因素共同驱动下,研究区稻-麦/油轮作地与稻-蔬轮作地间各土层氮素含量无明显

差异。研究区园林地主要用于种植旱作观赏性园艺植物,施肥程度较低且凋落物较少,导致进入土壤的氮源较少<sup>[30]</sup>。其次,植物生长发育需要吸收大量营养元素,尤其是氮素,树木可以从土壤中吸收并储存一部分于地上部<sup>[44]</sup>。同时,与其他 2 种农用地类型相比,园林地土壤剖面通气条件较好,土壤微生物活性较强,有机质分解较快,氮素更易流失<sup>[31]</sup>。此外,树木根系发达且分布较深,土壤孔隙度增加,更加剧土壤氮素向下迁移<sup>[27]</sup>。这些因素最终使得园林地表层土壤全氮和碱解氮含量显著低于其他 2 种用地方式。

成土母质主要通过影响土壤质地进而影响土壤氮素分布<sup>[45-46]</sup>。首先,当有机质被包裹在土壤团聚体中或通过物理、化学作用吸附到矿物表面时,可以保护土壤有机氮免受生物矿化作用的影响和提高土壤有机氮的化学稳定性<sup>[47-48]</sup>。土壤质地是控制土壤颗粒聚集、土壤结构、养分周转以及有机碳和其他养分与团聚体关系的基本属性<sup>[47]</sup>。多项研究<sup>[45,47,49]</sup>表明,土壤氮素含量与黏粒含量呈正相关。其次,黏质土壤淋滤率较低,有助于氮素积累<sup>[50]</sup>。此外,土壤黏粒含量和容重较低,可以降低植物根系渗透阻力,促进根系垂直生长,提高土体通透性,增加氮素淋溶风险<sup>[31]</sup>。Q3 老冲积物发育土壤黏粒含量和容重较高,因此矿物比表面积更大,土壤团聚体更多,土壤保水保肥能力高;Q4 灰棕冲积物和 Q4 灰色冲积物发育土壤其颗粒组成较粗,黏粒含量和容重较低,渗透性较好,氮素易随水向下淋失,其中,Q4 灰棕冲积物发育土壤黏粒含量高于 Q4 灰色冲积物<sup>[16-17]</sup>。因此,Q4 灰色冲积物发育土壤 0~40 cm 土层全氮和碱解氮含量低于其他 2 种母质发育土壤,而>60~100 cm 土层全氮含量明显高于 Q3 老冲积物发育土壤。

不同母质发育土壤固氮能力的差异使农地利用方式对土壤氮素的影响受控于成土母质。Q3 老冲积物发育土壤质地黏重,对氮素有较强的吸附固定能力,缓冲了其他成土因素带来的影响,使得各农地利用方式下该类型母质发育土壤氮素含量均无显著差异。相反,Q4 灰棕冲积物和 Q4 灰色冲积物发育土壤黏粒含量较低,固氮能力较差,且由于质地较粗利于树木根系生长,加剧氮素向下层土壤流失,再加上园林地外来氮源较少,最终导致园林地这 2 种母质发育土壤表层氮素含量低于其他 2 种用地方式,而 0~40 cm 土层全氮含量整体较高,尤其是迁移性较强的碱解氮含量远高于其他 2 种用地方式,这与 LI 等<sup>[31]</sup>研究结果类似。综上,对于农地

氮肥的精准管理和面源污染的精准防控,需要综合考虑不同农地利用方式下作物的生长需求和土壤母质类型带来的影响。

#### 4 结论

成都平原土壤氮素含量在垂直方向上随土壤深度增加而显著降低;在水平方向上全氮和碱解氮含量水平空间分布具有一定相似性,均呈现出由东北部和西南部向中部递减的趋势,氮素含量相对低值区主要分布在温江-郫县一带,小部分分散在其他区域,相对高值区主要分布在东北部彭州和新都交界处以及西南部崇州、大邑和邛崃区域。土壤剖面氮素含量随农地利用方式不同而发生改变。园林地表层土壤全氮和碱解氮含量低于其他2种用地类型,而稻-麦/油与稻-蔬轮作地之间各土层氮素含量均无显著差异。不同类型母质发育土壤剖面氮素含量也有所差异。Q4灰色冲积物发育土壤0~40 cm土层全氮和碱解氮含量低于其他2种母质发育土壤,而>60~100 cm土层全氮含量明显高于Q3老冲积物发育土壤。农地利用方式对土壤剖面氮素的影响受控于成土母质,Q3老冲积物发育土壤各土层氮素含量无明显差别;稻-麦/油轮作地Q4灰色冲积物发育土壤表层碱解氮含量显著高于稻-蔬轮作地;园林地Q4灰色冲积物和Q4灰棕冲积物发育土壤表层全氮和碱解氮含量低于其他2种用地方式,>20~40 cm土层则整体高于其他2种用地方式。

#### 参考文献:

- [1] LI Q Q, LUO Y L, WANG C Q, *et al.* Spatiotemporal Variations and Factors Affecting Soil Nitrogen in the Purple Hilly Area of Southwest China during the 1980s and the 2010s [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 173-181.
- [2] CHEN H S, ZHANG W, WANG K L, *et al.* Soil Organic Carbon and Total Nitrogen as Affected by Land Use Types in Karst and Non-Karst Areas of Northwest Guangxi, China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1086-1093.
- [3] JIANG Y F, RAO L, SUN K, *et al.* Spatio-temporal Distribution of Soil Nitrogen in Poyang Lake Ecological Economic Zone (South-China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 235-243.
- [4] DRESCHER G L, DA SILVA S, SARFARAZ Q, *et al.* Alkaline Hydrolyzable Nitrogen and Properties that Dictate Its Distribution in Paddy Soil Profiles [J]. *Pedosphere*, 2020, 30(3): 326-335.
- [5] LI C Z, LI C J, ZHAO L H, *et al.* Dynamics of Storage and Relative Availability of Soil Inorganic Nitrogen along Revegetation Chrono-quence in the Loess Hilly Region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 11-20.
- [6] NIE S A, ZHAO L X, LEI X M, *et al.* Dissolved Organic Nitrogen Distribution in Differently Fertilized Paddy Soil Profiles: Implications for Its Potential Loss [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 58-64.
- [7] ZHONG Y, YAN W M, SHANGGUAN Z P. Soil Carbon and Nitrogen Fractions in the Soil Profile and Their Response to Long-term Nitrogen Fertilization in a Wheat Field [J]. *CATENA*, 2015, 135: 38-46.
- [8] 张忠学, 宋健, 齐智娟, 等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(3): 42-49, 60. [ZHANG Zhong-xue, SONG Jian, QI Zhi-juan, *et al.* Effects of Reducing Nitrogen Fertilizer Application on Soil Nitrogen Distribution and Nitrogen Use Efficiency under Water-saving Irrigation [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(3): 42-49, 60.]
- [9] 陈琨, 赵小蓉, 王昌全, 等. 成都平原不同施肥水平下稻田地表径流氮、磷流失初探 [J]. *西南农业学报*, 2009, 22(3): 685-689. [CHEN Kun, ZHAO Xiao-rong, WANG Chang-quan, *et al.* Nitrogen and Phosphorus Loss by Surface Runoff in Different Fertilization Levels in Chengdu Plain [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(3): 685-689.]
- [10] HOBLEY E U, HONERMEIER B, DON A, *et al.* Decoupling of Subsoil Carbon and Nitrogen Dynamics after Long-term Crop Rotation and Fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 363-373.
- [11] 周洋, 赵小敏, 郭熙, 等. 寻乌县耕地土壤全氮含量空间变异特征及其影响因素 [J]. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1351-1358. [ZHOU Yang, ZHAO Xiao-min, GUO Xi, *et al.* Spatial Variation and Its Influencing Factors of Soil Nitrogen in Cultivated Land of Xunwu County [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6): 1351-1358.]
- [12] XUE Z J, CHENG M, AN S S. Soil Nitrogen Distributions for Different Land Uses and Landscape Positions in a Small Watershed on Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 204-213.
- [13] LI L D, KONKEL J, JIN V L, *et al.* Conservation Management Improves Agroecosystem Function and Resilience of Soil Nitrogen Cycling in Response to Seasonal Changes in Climate [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146457.
- [14] 马家桢, 张忠启. 江苏北部地区土壤全氮含量的时空变化 [J]. *江苏师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(3): 1-6, 77. [MA Jia-zhen, ZHANG Zhong-qi. Temporal and Spatial Variation of Soil Total Nitrogen in Typical Areas of Northern Jiangsu [J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39(3): 1-6, 77.]
- [15] GAO X S, XIAO Y, DENG L J, *et al.* Spatial Variability of Soil Total Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 279-289.
- [16] 张浩, 李启权, 唐嘉玲, 等. 成都平原西部土壤氮素空间变异特征及影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 295-302. [ZHANG Hao, LI Qi-quan, TANG Jia-ling, *et al.* Spatial Variability and Its Influential Factors of Soil Nitrogen in the Western Chengdu

- Plain[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2): 295-302.]
- [17] LI Q Q, DENG Q, FANG H Y, *et al.* Factors Affecting Cadmium Accumulation in the Soil Profiles in an Urban Agricultural Area [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151027.
- [18] CAO Z H, HUANG J F, ZHANG C S, *et al.* Soil Quality Evolution after Land Use Change from Paddy Soil to Vegetable Land [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 97-103.
- [19] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 652-660. [LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, *et al.* Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 652-660.]
- [20] 吴德勇, 张新, 李启权, 等. 德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征及影响因素分析 [J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(6): 814-820. [WU De-yong, ZHANG Xin, LI Qi-quan, *et al.* Spatial Variability of Soil Nitrogen and Its Impacting Factors in Jingyang District, Deyang City [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(6): 814-820.]
- [21] ZHANG S R, XIA C L, LI T, *et al.* Spatial Variability of Soil Nitrogen in a Hilly Valley: Multiscale Patterns and Affecting Factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564: 10-18.
- [22] 全思懋, 王绪奎, 胡锋. 江苏省农田土壤全氮含量变化及其影响因子 [J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(6): 1078-1084. [QUAN Si-mao, WANG Xu-kui, HU Feng. Changes of Soil Total Nitrogen Content in Farmland of Jiangsu Province and Its Influencing Factors [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(6): 1078-1084.]
- [23] ZHANG H H, KARIMAN K, ZHU L, *et al.* Spatial Distribution of Carbon, Nitrogen and Sulfur in Surface Soil across the Pearl River Delta Area, South China [J]. *Geoderma Regional*, 2021, 25: e00390.
- [24] 邹刚华, 赵凤亮, 单颖. 典型红壤区不同土地利用方式下氮素垂直分布及其影响因素 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(5): 644-650. [ZOU Gang-hua, ZHAO Feng-liang, SHAN Ying. Vertical Distribution of Nitrogen and Its Influencing Factors under Different Land Use Patterns in a Typical Red Soil Region [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5): 644-650.]
- [25] DENG X F, MA W Z, REN Z Q, *et al.* Spatial and Temporal Trends of Soil Total Nitrogen and C/N Ratio for Croplands of East China [J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114035.
- [26] LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, *et al.* Negative Effects of Urbanization on Agricultural Soil Easily Oxidizable Organic Carbon down the Profile of the Chengdu Plain, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(3): 404-416.
- [27] 张元媛, 李呈吉, 方红艳, 等. 成都平原农地利用方式转变对不同母质土壤剖面磁化率的影响 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 89-96. [ZHANG Yuan-yuan, LI Cheng-ji, FANG Hong-yan, *et al.* Effects of Agricultural Land-use Change on Magnetic Susceptibility of Different Parent Soil Profile in Chengdu Plain [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 89-96.]
- [28] 唐杰, 王昌全, 李冰, 等. 川中丘陵区土壤有机质和碱解氮空间变异特征研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(6): 124-130. [TANG Jie, WANG Chang-quan, LI Bing, *et al.* Spatial Variability and Its Influencing Factors of Soil Organic Matter and Alkaline Nitrogen in Central Hilly Area of Sichuan [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(6): 124-130.]
- [29] 杨小林, 李义玲, 朱波, 等. 紫色土小流域不同土地利用类型的土壤氮素时空分异特征 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(10): 2807-2813. [YANG Xiao-lin, LI Yi-ling, ZHU Bo, *et al.* Spatial and Temporal Variations of Soil Nitrogen under Different Land Uses in a Small Watershed in the Purple Soil Area, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2807-2813.]
- [30] 李呈吉, 张元媛, 方红艳, 等. 成都平原近40年来表层土壤全磷变化及其与农地利用方式转变的关系 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 187-194. [LI Cheng-ji, ZHANG Yuan-yuan, FANG Hong-yan, *et al.* Changes of Total Phosphorus in Topsoil and the Correlations with Agricultural Land-use Change across the Chengdu Plain during the Past 40 Years [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 187-194.]
- [31] LI Q Q, LI A W, DAI T F, *et al.* Depth-dependent Soil Organic Carbon Dynamics of Croplands across the Chengdu Plain of China from the 1980s to the 2010s [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 4134-4146.
- [32] LI S, LI Q Q, WANG C Q, *et al.* Spatial Variability of Soil Bulk Density and Its Controlling Factors in an Agricultural Intensive Area of Chengdu Plain, Southwest China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 290-300.
- [33] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏, 等. 江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其主控因素 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 304-312. [ZHANG Han, OUYANG Zhen-cheng, ZHAO Xiao-min, *et al.* Spatial Variation of Soil Nitrogen and Its Main Controlling Factors in Cultivated Land of Jiangxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 304-312.]
- [34] 田雨桐, 韩志伟, 赵然, 等. 西南岩溶农业区典型土地利用对土壤氮素特征的影响 [J]. *中国农学通报*, 2022, 38(33): 89-96. [TIAN Yu-tong, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, *et al.* Effects of Typical Land Use Types on Soil Nitrogen Characteristics in Karst Agricultural Areas of Southwest China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(33): 89-96.]
- [35] 陈青松, 李婷, 张世熔, 等. 城乡交错带土壤氮素空间分布及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2133-2141. [CHEN Qing-song, LI Ting, ZHANG Shi-rong, *et al.* Spatial Distribution of Soil Nitrogen in an Urban-rural Fringe and Its Influencing Factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2133-2141.]
- [36] 陈肖, 张世熔, 黄丽琴, 等. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 1-7. [CHEN Xiao, ZHANG Shi-rong, HUANG Li-qin, *et al.* Spatial Distribution Characteristic and Its Influential Factors of Soil Nitrogen in Chengdu Plain [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 1-7.]
- [37] 李义玲, 李太魁, 顾令爽, 等. 紫色土丘陵区小流域不同土地利用方式土壤氮磷储量特征 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(31): 133-137. [LI Yi-ling, LI Tai-kui, GU Ling-shuang, *et al.* Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Reserves of Different

- Land Use Modes of Small Watershed in Purple Hilly Area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(31): 133-137.]
- [38] LIU S S, QIN T L, DONG B Q, *et al.* The Influence of Climate, Soil Properties and Vegetation on Soil Nitrogen in Sloping Farmland [J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1480.
- [39] LI Q Q, LI A W, YU X L, *et al.* Soil Acidification of the Soil Profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s [J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134320.
- [40] 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 等. 成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3555-3564. [LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, *et al.* Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3555-3564.]
- [41] 王斌, 黄盛怡, 闵庆文, 等. 高复种指数区成都市郫都区农田土壤养分特征及其空间变异研究 [J]. 生态科学, 2020, 39(3): 151-159. [WANG Bin, HUANG Sheng-yi, MIN Qing-wen, *et al.* Soil Nutrient Characteristics and Spatial Variability of Farmland in High Multiple Cropping Index Area of Pidu District, Chengdu City [J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 151-159.]
- [42] 张文婧, 王昌全, 袁大刚, 等. 四川省主要作物施肥现状、问题与对策 [J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 697-703. [ZHANG Wen-jing, WANG Chang-quan, YUAN Da-gang, *et al.* Status, Problems and Countermeasures of Main Crops' Fertilizer Application in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 697-703.]
- [43] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应 [J]. 土壤, 2005, 37(2): 113-120. [SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, *et al.* Gaseous Loss of Nitrogen from Fields and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen and Their Environmental Effects [J]. Soils, 2005, 37(2): 113-120.]
- [44] LUO Y L, LI Q Q, SHEN J, *et al.* Effects of Agricultural Land Use Change on Organic Carbon and Its Labile Fractions in the Soil Profile in an Urban Agricultural Area [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(15): 1875-1885.
- [45] GALANTINI J A, SENESI N, BRUNETTI G, *et al.* Influence of Texture on Organic Matter Distribution and Quality and Nitrogen and Sulphur Status in Semiarid Pampean Grassland Soils of Argentina [J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 143-152.
- [46] BARRÉ P, DURAND H, CHENU C, *et al.* Geological Control of Soil Organic Carbon and Nitrogen Stocks at the Landscape Scale [J]. Geoderma, 2017, 285: 50-56.
- [47] GE N N, WEI X R, WANG X, *et al.* Soil Texture Determines the Distribution of Aggregate-associated Carbon, Nitrogen and Phosphorous under Two Contrasting Land Use Types in the Loess Plateau [J]. CATENA, 2019, 172: 148-157.
- [48] ADHIKARI G, BHATTACHARYYAK G. Correlation of Soil Organic Carbon and Nutrients (NPK) to Soil Mineralogy, Texture, Aggregation, and Land Use Pattern [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(11): 735.
- [49] GAMI S K, LAUREN J G, DUXBURY J M. Influence of Soil Texture and Cultivation on Carbon and Nitrogen Levels in Soils of the Eastern Indo-gangetic Plains [J]. Geoderma, 2009, 153(3/4): 304-311.
- [50] ZHONG Q M, ZHANG S R, CHEN H L, *et al.* The Influence of Climate, Topography, Parent Material and Vegetation on Soil Nitrogen Fractions [J]. CATENA, 2019, 175: 329-338.

作者简介: 冉敏(1998—), 女, 四川营山人, 主要研究方向为土壤质量演变。E-mail: ranm2022@163.com

(责任编辑: 王昌群)