

DOI: 10.11766/trxb202109300537

宫殿清, 王兆锋, 张镔铨, 胡晓阳, 谷昌军, 魏 博. 拉萨河谷设施农地土壤质量变化及空间分异特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1582–1594.

GONG Dianqing, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, HU Xiaoyang, GU Changjun, WEI Bo. Soil Quality Change and Spatial Differentiation Characteristics of Greenhouses Land Soil in Lhasa River Valley[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1582–1594.

拉萨河谷设施农地土壤质量变化及空间分异特征*

宫殿清^{1, 2}, 王兆锋^{1, 2†}, 张镔铨^{1, 2, 3}, 胡晓阳^{1, 2}, 谷昌军^{1, 2},
魏 博^{1, 2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: 青藏高原设施农地存在土壤质量变化的迹象, 而拉萨河谷作为青藏高原地区设施农地的主要分布区, 其土壤质量的整体变化及区域分异规律尚不明确。以大田耕地为参照, 采集设施农地土壤样品 240 个和大田耕地土壤样品 112 个, 测定了土壤理化指标 21 项, 采用土壤综合质量指数和因子探测器方法, 研究了设施农地土壤质量变化及空间分异特征, 并辨识设施农地土壤质量变化的主要因子。结果表明: (1) 拉萨河谷设施农地和本底土壤质量指数分别为 0.36、0.43, 两者 80% 的样地土壤质量等级均分布在 V~III 级; 且设施农地土壤质量较高的样地主要分布在海拔 3 700~3 750 m, 距河流 930 m 内的阳坡地带。(2) 较大田耕地, 设施农地土壤质量指数平均下降了 16.28%, 且存在明显空间差异。其中堆龙德庆区土壤质量下降最明显, 平均降低了 74.46%。不同深度上, 0~10 cm 范围内土壤质量下降最明显, 平均下降了 6.5%。(3) 受海拔和坡向影响, 设施农地土壤质量整体变化存在空间分异。即随着海拔增加和阳坡到阴坡的变化, 设施农地土壤质量变化幅度均表现为明显增大趋势。(4) 全区设施农地土壤质量变化普遍受到含盐量、速效钾和镉含量变化的影响, 三者解释力均可达到 20% 以上。综上, 本研究明晰了高原设施农地土壤质量整体变化及其空间分异, 为该地区设施农业布局和发展提供了理论依据。

关键词: 土地利用; 温室土壤; 土壤质量; 空间分异; 拉萨河谷; 青藏高原

中图分类号: K903 文献标志码: A

Soil Quality Change and Spatial Differentiation Characteristics of Greenhouses Land Soil in Lhasa River Valley

GONG Dianqing^{1, 2}, WANG Zhaofeng^{1, 2†}, ZHANG Yili^{1, 2, 3}, HU Xiaoyang^{1, 2}, GU Changjun^{1, 2}, WEI Bo^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: 【Objective】 Soil quality problems often arise in the process of greenhouse agriculture pursuing economic benefits.

* 国家自然科学基金项目 (41771113)、第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0603)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040201) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41771113), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No.2019QZKK0603), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA20040201)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangzf@igsnr.ac.cn

作者简介: 宫殿清 (1993—), 男, 博士研究生, 主要从事青藏高原土地利用变化的土壤环境效应研究。E-mail: gongdq.18s@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2021-09-30; 收到修改稿日期: 2021-11-23; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-01-04

There are also signs of soil quality changes in the Tibet Plateau greenhouse land, and the regional differentiation pattern of soil quality changes in the Lhasa Valley. The Lhasa Valley is the main distribution area of greenhouse plots on the Tibet Plateau. Nevertheless, there is limited research that integrates the physical and chemical properties of its soil to reflect overall soil quality changes in the facility farmland with a comprehensive index, and the overall soil quality changes and their regional differentiation patterns are not yet clear. **【Method】**Taking the arable land soil samples as the references, this study collected 240 soil samples of greenhouse land and 112 soil samples of arable land. The texture, pH value, water-soluble total salt content, organic matter, total nitrogen, alkali-hydro nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium, and soil heavy metals elements (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As, Hg) were determined. The comprehensive soil quality index and factor detector methods were used to study the soil quality changes and spatial differentiation characteristics of the greenhouse land soil in Lhasa Valley, and the main factors of soil quality changes in the greenhouse land soil were identified. **【Result】**The comprehensive soil quality indices of the Lhasa valley greenhouse land and the arable land soil were 0.36, and 0.43, respectively. The soil quality grades of 80% of both samples were distributed in V~III. The soil quality of the greenhouse land was relatively high on the sunny slopes within 930 m from the river at an altitude of 3,700~3,750 m in the area. Secondly, there were spatial differences in the degree of soil quality variation in the study area. The SQI of the greenhouse land decreased by 16.28% on average compared to that of the larger field farmland. Among them, soil quality in the Doilungdeqen county decreased most significantly, with an average decrease of 74.46%. At different depths, soil quality decreased most significantly in the range of 0~10 cm, in which the average decline was 6.5%, and the highest percentage of declining sample plots, at 66.67. Thirdly, there was spatial heterogeneity in soil quality changes in the greenhouse land affected by altitude and slope direction. With the increase of elevation and the change of soil quality from sunny slope to shady slope, the change of soil quality in the agricultural land facilities showed a significant trend of increase. Finally, analysis of the soil quality change factors in greenhouse land found that the soil quality change in the whole region was generally affected by changes in salt content, available potassium and cadmium content, and the explanatory power of all three could reach 20%. **【Conclusion】**Under the changing influence of salt accumulation, available potassium and cadmium content changes, the overall soil quality of the study area's greenhouse land showing a decreasing trend and varied significantly in different regions. This could provide a theoretical basis for the layout and development of greenhouse agriculture in the region.

Key words: Land use; Greenhouse soil; Soil quality; Spatial differentiation; Lhasa River valley; Tibet Plateau

设施农地土壤是指设施温室栽培条件下的耕种土壤，是设施农业种植的物质基础，其质量变化直接影响设施农业的可持续发展^[1-4]。随着居民饮食结构改善和种植技术的不断提高，设施农业在中国得到了迅猛发展，中国已成为世界上设施蔬菜种植面积最大的国家^[5]。然而，设施农业在追求经济收益的过程中，往往大量施用化肥农药，加之长期封闭式种植、水热失衡等原因^[6]，导致土壤质量发生变化。

目前，世界多地的设施农地土壤表现出了酸化、次生盐渍化、养分失调、重金属富集等土壤质量问题。例如，澳大利亚^[7]、地中海^[8]和土耳其安塔利亚地区^[9]发现了设施农地土壤出现盐分累积和重金属累积现象。国内的山东寿光^[10-12]、上海市郊^[13]、辽宁沈阳^[14]、陕西关中^[15]、甘肃武威^[16]等地设施农地土壤表层均出现明显的酸化、盐化、重金属富集等

一系列土壤质量变化。但目前的研究多针对土壤pH、盐分、重金属元素等具体要素进行分析，缺乏对设施农地土壤质量整体状况的解析，特别是综合土壤物理、化学特性，以一个综合指标来反映设施农地土壤整体质量变化的研究非常有限。同时，由于自然条件和人为因素的差异，土壤质量变化往往存在着空间异质性^[17]。而对这种异质性的认识受到研究尺度的制约^[18]。在流域尺度上，研究认为土地利用方式对土壤理化性质有着显著影响^[19]，并且在不同海拔、地形部位，存在空间差异^[20]。例如，黄土丘陵沟壑区受坡向和地块面积影响，土壤综合质量呈西高东低特征^[21]。三峡库区受不同地貌影响，从低山区至平土坝地区，耕地土壤质量呈升高趋势^[22]。松花江河谷地区^[23]和岷江上游河谷^[24]，耕地质量随海拔增加呈升高趋势。

拉萨河谷是西藏设施农地主要分布区^[25-26], 设施农地土壤质量也发生了一定程度的变化^[27-28]。因该区地处拉萨河两岸, 其土壤质量变化的影响更加广泛和深远^[28]。因此, 有必要明确设施农地土壤质量整体变化。区内设施农地分布受海拔、坡度、坡向和河流等要素的影响^[29], 设施农地重心向郊区迁移, 新增设施农地则向较大坡度和更高海拔转移, 那么设施农地土壤质量及其变化是否存在空间分异规律? 因此, 本研究以拉萨河谷设施农地土壤为研究对象, 研究不同样地、不同土层深度的设施农地土壤质量整体变化及其空间分异特征, 辨识设施农地土壤质量变化的主要因子, 为高原设施农业因地制宜进行布局和调整提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

拉萨河流域是西藏自治区主要农耕区之一, 位于 29°19'~31°15' N、89°45'~93°08' E 之间, 地处青藏高原中南部, 雅鲁藏布江中游北岸, 区域面积为 3.17 万 km²。气候属高原温带半干旱季风季候, 干湿季节分明, 年日照时数超过 3 000 h, 有利于设施农业发展。年均温约为 7.4℃; 年降水量为 200~

510 mm。流域地质构造属冈底斯-念青唐古拉地质构造区, 地貌为山间宽谷湖盆。地形起伏大, 平均海拔约 4 300 m, 谷底海拔约在 3 600~3 800 m; 地势东北高西南低; 平原面积狭小, 呈阶梯状分布。区内设施农地呈串珠状分布在拉萨河干流和支流堆龙曲的两岸阶地^[26], 土壤类型以潮土、高山灌丛草原土为主, 多用于种植蔬菜, 少部分栽培花卉和水果, 灌溉水源为拉萨河水和地下水(图 1)。

1.2 样品收集与处理

采样区域为拉萨河流域设施农地集中分布的曲水县、堆龙德庆区、城关区、达孜区、林周县和墨竹工卡县, 并采集设施农地相邻的大田耕地土壤作为参照。土壤样点的布局涵盖不同海拔、坡向、距河流距离和河谷位置的设施温室园区。样地数量根据设施农地面积确定, 即采样区面积占各县设施农地面积的 15%, 选取了 18 个设施温室集中分布的样地, 共计取得 352 个土壤样品。其中设施农地土壤 (Greenhouse land soil, GS) 样品 240 个, 大田耕地土壤样品 (Arable land soil, AS) 112 个。土壤采样运用梅花采样法, 每个样点采集 5 个样品均匀混合, 每个样品取 0~10 cm, 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm, 共 4 个深度。土壤样品经自然风干后, 在西南大学资源环境学院分析测试。测定土壤理化指标

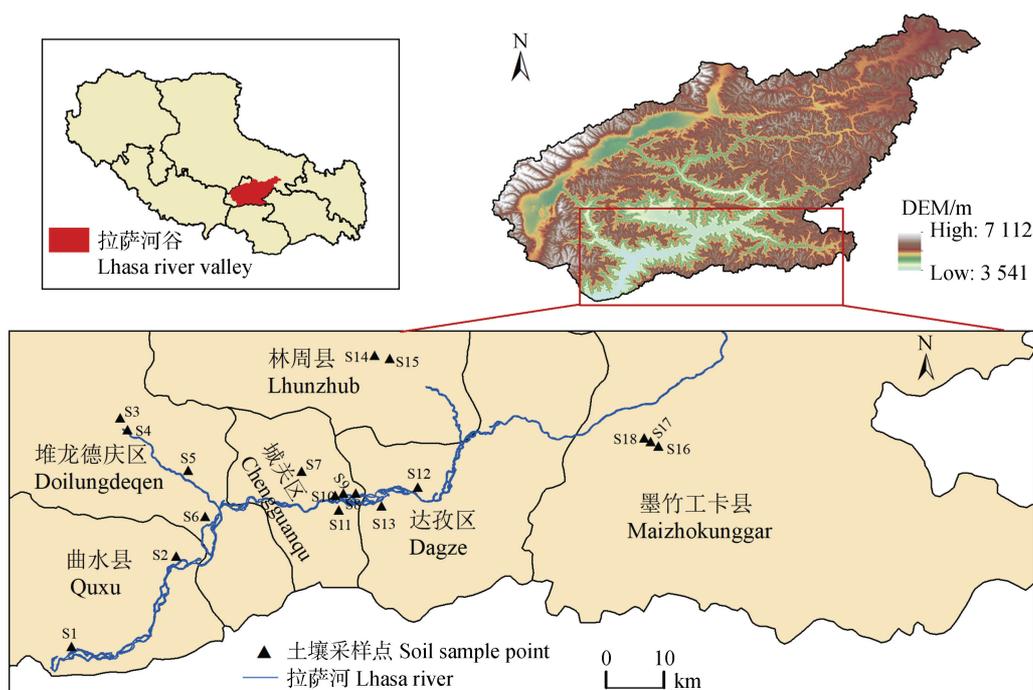


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Overview of study area

包括土壤质地、pH、水溶性全盐 (Soluble total salt, TS)、有机质 (Organic matter, OM)、全氮 (Total nitrogen, TN)、全磷 (Total phosphorus, TP)、全钾 (Total potassium, TK)、碱解氮 (Alkali-hydro nitrogen, AN)、有效磷 (Available phosphorus, AP)、速效钾 (Available potassium, AK)、重金属元素 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、类金属元素 As。

实验方法参照土壤农化分析方法, 土壤质地采

用激光粒度仪测定, pH 采用玻璃电极法; 水溶性全盐量采用干残渣法; 有机质采用重铬酸钾容量法; 全氮采用凯氏定氮法; 全磷采用酸融—钼锑抗比色法; 全钾采用酸熔—火焰光度计法; 碱解氮采用氢氧化钠—碱解扩散法; 有效磷采用 Olsen 法; 速效钾采用 NH₄Ac 浸提—火焰光度法。重金属元素采用微波消解—火焰原子吸收光谱法; 全汞和全砷采用微波消解—多通道原子荧光仪法。

表 1 拉萨河谷土壤样品采集信息

Table 1 Information of the collection of soil samples in the Lhasa River valley

县域	样地编号	样地几何中心位置		样地平均海拔	坡向	河谷位置	距离河流距离	设施农地 土样数量	大田耕地 土样数量	
County	Site code	Geometric center position/°		Average elevation/m	Slope direction	Location	Distance from river/m	Number of GS	Number of AS	
曲水县	S1	29°23'36"N	90°47'23"E	3 589	南	下段	939	8	4	
	Quxu	S2	29°32'19"N	90°57'12"E	3 613	东南	下段			1 200
堆龙德庆区	S3	29°44'19"N	90°49'02"E	3 790	南	中段	940	13	6	
	Doilungdeqen	S4	29°43'19"N	90°50'01"E	3 766	南	中段			436
	S5	29°40'23"N	90°57'09"E	3 700	东北	中段	1 300			
城关区	S6	29°36'21"N	90°59'42"E	3 660	东北	中段	1 247	16	7	
	Chengguanqu	S7	29°42'47"N	90°09'20"E	3 707	东南	中段			555
	S8	29°40'27"N	90°15'30"E	3 673	南	中段	335			
	S9	29°40'17"N	90°14'09"E	3 675	南	中段	459			
达孜区	S10	29°40'57"N	90°13'19"E	3 668	南	中段	337	5	3	
	Dagze	S11	29°39'40"N	90°14'56"E	3 675	南	中段			1 491
林周县	S12	29°40'35"N	90°18'25"E	3 682	东南	中段	1 110	8	3	
	Lhunzhub	S13	29°42'48"N	90°22'02"E	3 705	东南	中段			1 123
墨竹工卡县	S14	29°53'23"N	90°15'26"E	3 733	西南	上段	249	10	5	
	Maizhokunggar	S15	29°53'18"N	90°17'07"E	3 747	南	上段			796
	S16	29°49'09"N	90°46'39"E	3 834	东北	上段	925			
	S17	29°49'54"N	90°46'24"E	3 842	东	上段	937			
	S18	29°49'34"N	90°47'19"E	3 853	西北	上段	947			

1.3 基础地理数据

研究区土壤样点的海拔和坡向从 30 m 的 DEM 数据中提取, 来源于地理空间数据云 GDEM V2 数据 (<http://www.gscloud.cn>); 经纬度信息由 GPS 定位仪记录。拉萨河及其支流、道路数据源于《西藏自治区拉萨市与拉萨河流域湿地分布图》^[30], 县域

行政中心和行政界线数据来源于 1:400 万国家基础地理信息系统。

1.4 土壤综合质量指数

1997 年, 赵其国^[31]系统介绍了美国土壤质量评价方法。自此, 土壤质量综合评价思想和方法在我国土壤质量分析研究中得到广泛运用^[32]。张汪

寿^[33]、郑琦等^[34]在综合土壤物理、化学和生物等指标的基础上,设计了一种土壤综合质量指数法(Soil Quality Index, SQI)。本文利用 SQI 指数分析拉萨河谷大田耕地和设施农地土壤质量状况及区域差异。计算公式如下:

$$SQI = \begin{cases} 0 & PI_{Ave} > 1 \\ \sqrt{(SFI_{Min}^2 + SFI_{Ave}^2) / (PI_{Max}^2 + PI_{Ave}^2)} & 0.3 < PI_{Ave} \leq 1 \\ \sqrt{SFI_{Min}^2 + SFI_{Ave}^2} & PI_{Ave} \leq 0.3 \end{cases}$$

式中, SFI=土壤肥力指标的实测值 S_i /各肥力指标的分级标准 S , SFI_{Min} 为 SFI 最小值, SFI_{Ave} 为 SFI 平均值。PI=土壤污染物实测值 C_i /土壤污染风险管控标准风险筛选阈值 C 。 PI_{Max} 为 PI 最大值, PI_{Ave} 为 PI 的平均值。

评价模型指标包括养分指标和土壤污染物指标^[33]。其中,土壤养分指标包括有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾 7 个指标;土壤污染物指标包括对人体和植物有害的 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg;土壤 pH、盐分、黏粒含量在一定范围内对土壤产生消极影响,制约植物的正常生长,故按照土壤污染物指标计算。参照《全国第二次土壤普查养分分级标准》^[35]和《土壤质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[36],其中 OM、TN、TP、TK、AN、AP 和 AK 的 5 取值为养分分级标准的 I 级阈值,即保证土壤各项养分属于丰富状态。结合拉萨河谷大田土壤中性、含盐量较低的砂壤土特点^[28], pH、含盐量、黏粒含量的 C 值分别取拉萨大田耕地土壤指标所在范围的最大阈值,分别为 7.5、0.5%和 15%。参考拉萨河谷设施农地实际情况,将 SQI 划分为 I~V 级,对应分级分别为 >0.8、0.6~0.8、0.4~0.6、0.3~0.4、<0.3。

为避免 SQI 值过大或者过小,依据拉萨河谷设施农地基本状况对 PI_{Ave} 进行约束,取 0.3 和 1 为限制值。当 PI_{Ave} 为 0.3 时,研究区不同采样点土壤中各项污染物指标(Cd 除外)无超标情况,各样地污染物指数均高于 0.3;鉴于植物可正常生长,可以忽略某一污染物指标对土壤质量的制约。当 PI_{Ave} 为 1 时,表明所有污染物指标均达到超标阈值上限或存在一个或多个污染物指标大幅超标,对土壤质量制

约明显。当 $0.3 < PI_{Ave} \leq 1$ 时,公式的分母($PI_{Max}^2 + PI_{Ave}^2$)既可突出单个污染物指标对土壤质量的影响,又综合考虑了污染物的总体水平;分子($SFI_{Min}^2 + SFI_{Ave}^2$)既反映了植物生长过程中受养分较低指标的影响,也突出了土壤总体养分对土壤质量的贡献;该方法体现了土壤理化指标的相互作用和相互影响^[31]。

1.5 因子探测器

因子探测器是探测自变量在多大程度上解释了因变量的空间分异性,其大小用 q 值来衡量,该方法隶属于 Wang 等^[37]提出的地理探测器模型。本文运用因子探测器辨识了设施农地 SQI 变化的主要因子,公式如下:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

式中, $SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$, $SST = N \sigma^2$; $h=1, \dots, L$ 为土壤理化指标指数的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 为分层 h 的方差; σ^2 为全区的土壤质量变化幅度的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。 q 的值为 [0, 1], q 值越大表示因子的解释力越强。

1.6 数据分析

不同样地 SQI 的计算是从每个样地全部采样点数据中,分别提取每个样地内 SFU 的平均值和最小值,PI 的平均值和最大值。不同土层深度 SQI 计算是从每个样地内各层土壤采样点数据中,分别提取各层中 SFI 的平均值和最小值,PI 的平均值和最大值。土壤质量变化计算了设施农地较大田耕地 SQI 的变化倍数。因子分析过程中,每个样地中,不同土层 SQI 变幅作为因变量,与之对应的土壤各项理化指标的 SFI 和 PI 指数变幅作为自变量。根据王劲峰和徐成东^[38]提出数据离散化方法,采用等间距划分类别,对 18 类因子进行离散化处理。土壤样品数据经 Microsoft Excel 2016 整理后,利用 SPSS v26.0 检验数据在 0.05 (**)、0.01 (***) 水平上的显著性;利用 ArcGIS 10.3 统计土壤样点空间数据,Origin 2018 绘制图表。

2 结果

2.1 设施农地本底土壤质量状况

拉萨河谷设施农地主要自耕地转换而来^[25], 可将与之毗邻的大田耕地看作设施农地土壤本底。统计不同样地大田耕地土壤质量指数发现(图2), 大田耕地 SQI 平均为 0.43 ± 0.16 。其中, 堆龙德庆区 S5 样地 SQI 最高, 为 0.72; 曲水县 S1 样地 SQI 最小, 为 0.17。并且大部分样地分布在Ⅲ级(38.89%)和Ⅴ级(33.33%), 仅少数样地 SQI 达到Ⅱ级水平

(16.67%)。不同土层深度上, 全区大田耕地 SQI 整体随深度增加逐渐降低。即 SQI 均值从 0~10 cm 的 0.64 下降至 30~40 cm 的 0.42, 平均下降率为 13.20%。此外, 不同样地 SQI 均在 0~10 cm 和 10~20 cm 范围内出现 SQI 最大值, 表明大田耕地耕作层 0~20 cm 的土壤质量更优。空间上, 河谷中段及以上区域的大田耕地土壤质量高于河谷下段地区。其中中段的堆龙德庆区和城关区大田耕地 SQI 均值最高, 为 0.48。其次是河谷上段的林周县和墨竹工卡县大田耕地 SQI, 为 0.43。河谷下段的曲水县大田耕地 SQI 最低, 为 0.21。

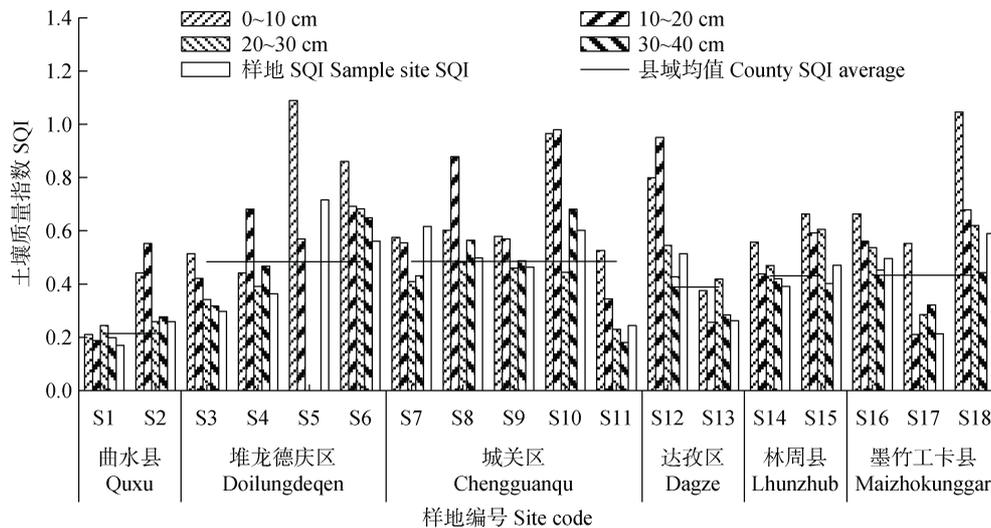


图2 不同样地和土层深度本底土壤质量指数

Fig. 2 The arable soil SQI for different sample sites and soil depths

2.2 设施农地土壤质量状况及空间分异规律

统计不同样地设施农地土壤质量指数发现(图3), 拉萨河谷设施农地 SQI 介于 0.15~0.62, 均值为 0.36 ± 0.16 。最高值出现在城关区 S7 样地, 最低值出现在堆龙德庆区 S3 样地。全区大部分样地的 SQI 等级分布在Ⅴ级(44.44%)和Ⅲ级(27.78%), 仅少数样地 SQI 达到Ⅱ级水平(11.11%)。不同土层深度上, 设施农地 SQI 变化小, 层间差异不明显; 即 0~30 cm 范围内, SQI 层间相差仅为 0.02, 这表明设施农地耕作一定程度上改善耕层土壤质量状况。空间分布上, 设施农地土壤质量从曲水县到墨竹工卡县整体表现出向好趋势。其中, 林周县设施农地 SQI 最高, 为 0.55; 土壤质量相对较低的区域 (SQI<0.3) 分布在曲水县、堆龙德庆区、墨竹工卡县。

土壤质量往往受自然和人为等多种要素的影

响。自然要素中海拔、坡度和坡向等是成土因素中重要的地形因子^[39-40], 而河流是研究区设施农地的主要灌溉水源地^[41]。因此, 本研究从海拔、坡向、河流距离角度, 探究拉萨河谷设施农地土壤质量空间分异特征(图4)。考虑到拉萨河谷设施农地耕作过程中往往进行土地平整, 一定程度上减少了坡度的影响, 因此土壤质量的空间分异特征中不考虑坡度要素。设施农地 SQI 随海拔、距河流距离的变化均呈抛物线型趋势。其中, 海拔 3 750 m 以下区域, 随海拔升高 SQI 呈增加趋势。在海拔 3 700~3 750 m 梯度内, SQI 最高, 平均为 0.52。距河流 930 m 范围内, 设施农地 SQI 随距离河流距离增加呈下降趋势, 但该范围内 SQI 指数相对较高, 平均达到 0.43。设施农地多分布于南坡, 且其 SQI 也高于其他坡向, 南坡 SQI 平均为 0.43。需要注意的是, 海

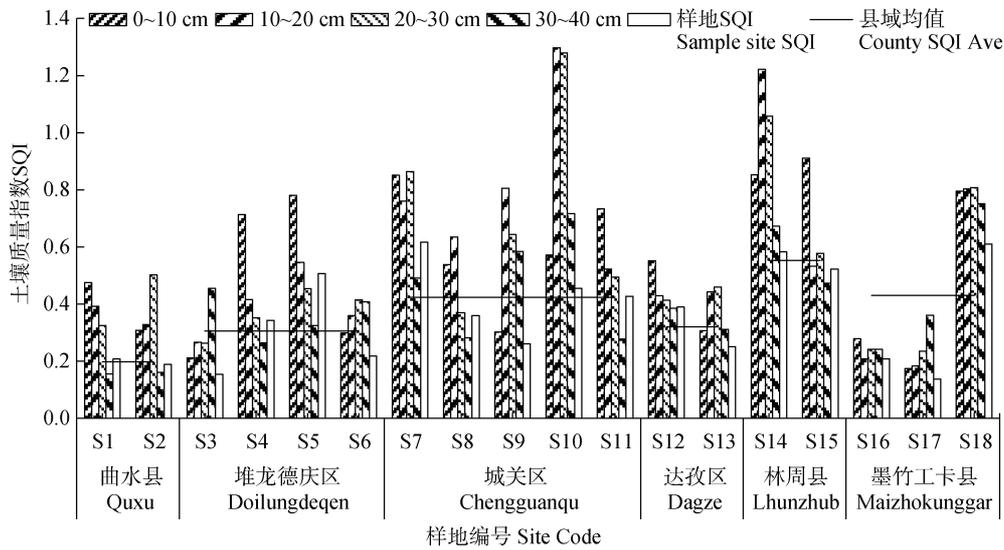


图3 不同样地设施农地土壤质量指数

Fig. 3 The greenhouse soil's SQI of different sample sites

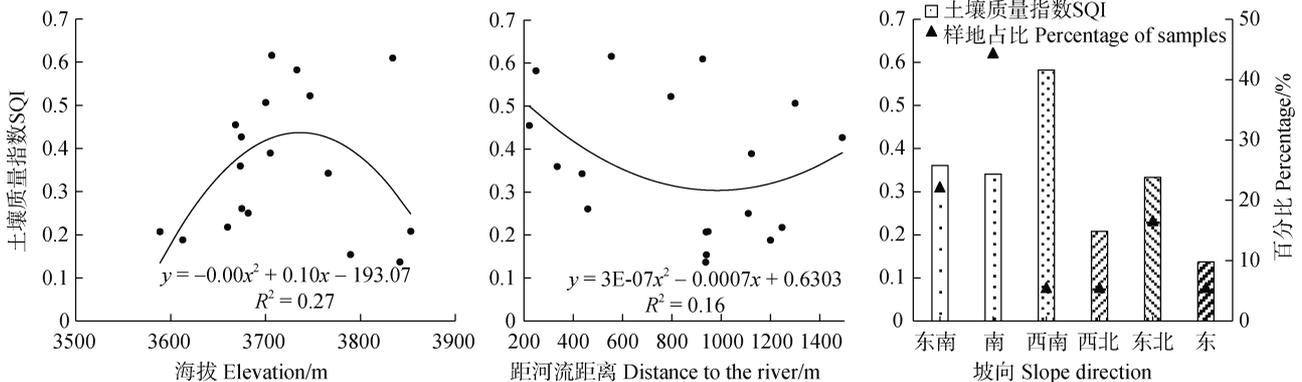


图4 不同样地农地土壤质量指数 (SQI) 随海拔、距离河流距离、坡向变化

Fig. 4 Variation of SQI with altitude, distance from the river and slope direction of different sample sites

拔、距河流距离，坡向等对设施农地 SQI 的影响均未达到显著水平，但一定程度上仍可以看到现有设施农地分布模式下，土壤质量存在空间分异。综上，拉萨河谷设施农地土壤质量水平较高的样地主要分布在海拔 3 700~3 750 m 范围内距河流 0~930 m 处的阳坡地带。该区域所处土壤多为河流冲积而成阶地，拉萨河主干流及支流呈弱碱性、总体矿化度较高以及丰水期微量元素相对丰富^[42-43]，为作物生长提供了良好的水土条件，阳坡则提供了充足的光照。

2.3 设施农地土壤质量变化

统计不同样地 SQI 变幅发现 (图 5)，设施农地土壤质量整体呈下降趋势，区域差异较明显 ($P <$

0.1)。全区设施农地土壤质量变幅介于-157%~43%，较大田耕地平均降低了 16.28%。县域尺度上，堆龙德庆区的设施农地土壤质量下降最明显，SQI 平均下降了 74.46%，其次是墨竹工卡县，SQI 平均下降了 63.49%，但林周县的设施农地土壤质量呈改善态势，SQI 平均提高了 21.42%。样地尺度上，近 80% 的样地出现土壤质量下降。其中堆龙德庆区 S6 号样地降幅最大，达到-157%，其次是墨竹工卡县 S16 号样地，降幅为-138%。不同土层深度，0~10 cm 范围内的土壤质量下降趋势更甚。主要表现为不同深度范围内，仅 0~10 cm 范围内土壤质量整体下降，平均下降了 6.5%。随土层深度增加，土壤质量

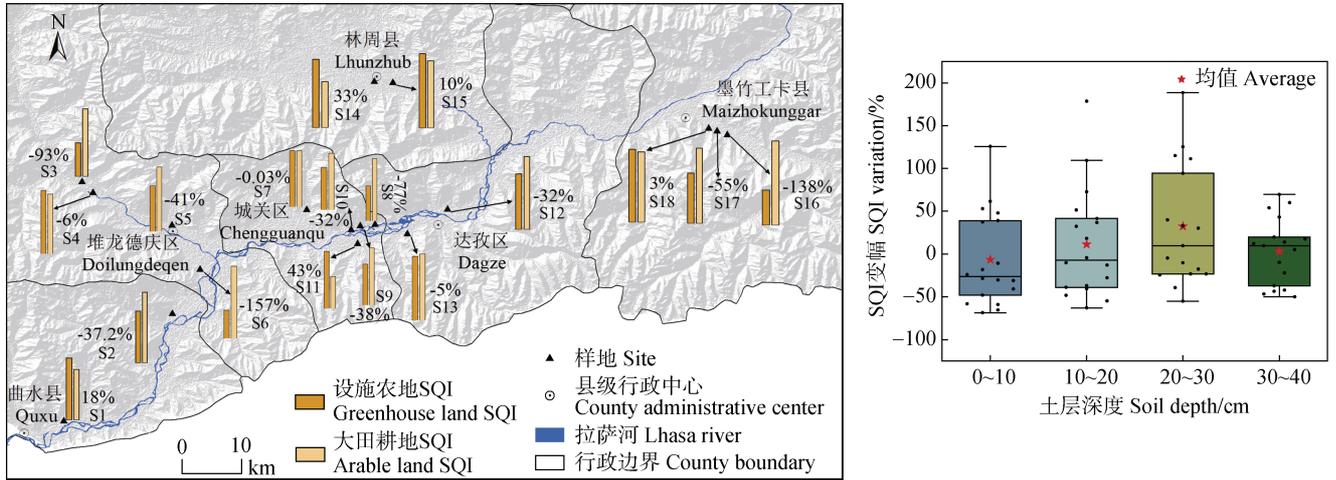


图 5 拉萨河谷设施农地 SQI 变幅
Fig. 5 Variation of greenhouse land's SQI in the Lhasa River valley

下降的样地数量占比呈递减趋势。即土壤质量下降的样地数比例从 0~10 cm 的 66.67% 下降至 30~40 cm 的 41.12%，平均下降率为 14.83%。

2.4 设施农地土壤质量变化的空间分异特征

统计不同样地设施农地土壤质量变化幅度随海拔、距河流距离、坡向发现（图 6），随海拔增加，设施农地 SQI 变幅整体增大，这意味着海拔越高，

土壤质量下降趋势越明显。这其中 SQI 下降的样地，随海拔增加其下降趋势更显著。随着坡向从阳坡到阴坡，SQI 变幅整体呈增大趋势。设施农地土壤质量变幅随着距河流距离的增加并无明显的空间分异规律，而且设施农地土壤质量下降的样地在 0~1400 m 范围内，分异也不明显，这表明距离河流距离要素的变化并不对土壤质量变化产生明显影响。

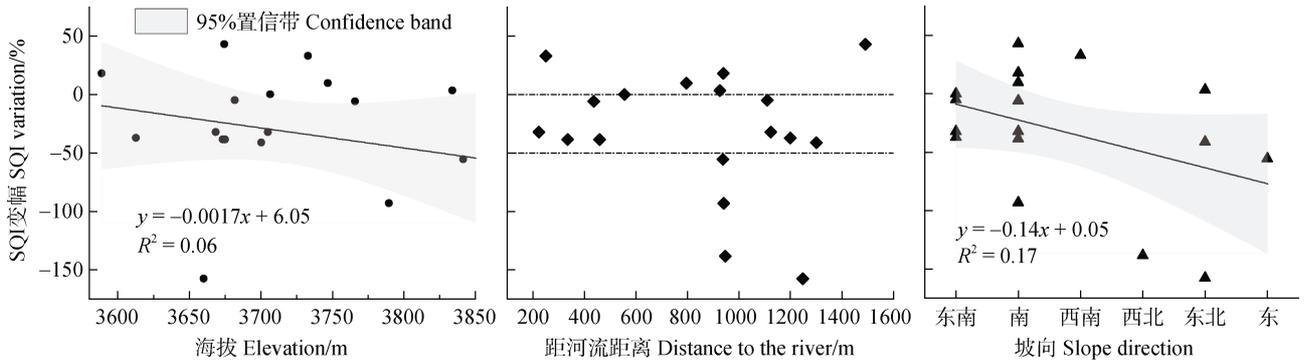


图 6 不同样地 SQI 变幅随海拔、距离河流距离、坡向变化
Fig. 6 Variation of SQI with altitude, distance from the river and slope direction

2.5 设施农地土壤质量变化影响因子

利用因子探测器对不同土层深度的设施农地 SQI 变幅进行因子定量分析，不同因子对设施农地 SQI 变幅的解释力不同。含盐量、速效钾和镉含量变化显著影响设施农地 SQI 变幅的空间格局 ($P < 0.01$)。其中含盐量变化解释力最高，为 25%；其次是速效钾和镉含量变化，两者解释力也超过了 21%；这表明全区设施农地土壤质量下降普遍受到

含盐量、速效钾养分和镉含量变化的影响。研究区设施农地土壤含盐量和速效钾含量，较大田耕地分别增加了 0.23%， $50.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增幅近 1 倍。全区设施农地和大田耕地镉元素平均含量均为 $0.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，超过农用地二级阈值 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，是 SQI 指数变化的重要贡献因子。但全区镉元素累积趋势不明显，即不同土层，镉含量平均增幅约为 5%。这一方面反映并非单纯是设施农业耕作导致了 Cd 元

素超标,另一方面还可能受该区域成土母岩中多钷矿,从而伴生丰富的镉元素影响^[44]。土壤 pH、全钾、锌元素和速效磷含量的变化提供的解释力均可达到 10%,但未通过显著性检验;这表明在局部区域土壤质量变化可能还受到土壤 pH、全钾和速效磷养分、锌含量变化的影响。

3 讨论

3.1 设施农地土壤质量变化及其空间分异规律探讨

设施农地高强度的利用过程中,往往对土壤产生一系列负面影响,致使土壤整体质量降低^[45-46]。拉萨河谷设施农地土壤质量整体呈下降趋势,较大田耕地平均降低了 16.28%,且表层土壤整体质量呈下降趋势。拉萨河谷设施农地土壤质量下降明显的区域,主要分布在堆龙德庆区和墨竹工卡县。研究发现含盐量和速效钾养分增加是设施农地土壤质量变化主要原因,这可能与种植年限长、高复种指数条件下施肥量增大密切相关^[12-14, 45]。其中,堆龙德庆区的设施农地种植年限多为 8~12 a,土壤盐分累积使得土壤整体质量下降,而且在我国中东部地区 8 年以上的设施农地土壤盐分也显著高于露地栽培土壤^[47]。墨竹工卡县设施农地土壤整体质量则受施肥量影响大。该区域设施农地所处海拔相对更高,土壤质地中砂粒占比大^[25]。实地调研发现,相较于其他区县,设施农地平均施肥量高出 20%~50%,且多为高成分类型的肥料,易导致土壤整体质量下降。表层土壤质量整体下降则可能与无雨水淋洗使得肥料易于在土壤表层堆积有关^[45],设施农地土壤表层均有不同程度的盐分累积和酸化现象。加之部分复合肥中含有一定重金属元素^[48],则会导致土壤中重金属元素含量增加,进一步使得土壤整体质量下降。

拉萨河谷海拔、坡度、坡向和河流等自然要素差异大,设施温室的布局和发展受这些因素影响,存在明显的空间差异^[25]。设施农地多分布在河谷两岸的阶地,肥力水平高于洪积扇、河漫滩和坡地^[49],本实验也发现大田耕地 0~20 cm 范围内土壤质量较高。阶地作为设施农地主要集中区,一方面长期耕作使得设施农地土壤质量层间差异小于大田耕地;但也造成了土壤整体质量明显下降,即除林周县外,各区县设施农地样地均出现不同程度的土壤

质量下降。其中,城关区和堆龙德庆区土壤整体质量下降明显,这与其设施农地开发早,耕作时间长有关^[25]。此外,海拔相对更高的墨竹工卡县,大田耕地土壤的粗骨性特点更加明显^[49],并且设施农地分布在河流阶地和洪积扇交汇处,肥力水平低于阶地,因此设施农地利用和改造强度可能高于其他区县,使得该区土壤整体质量下降。

与此同时,土壤受自然环境要素和土壤环境要素影响,往往其土壤质量也呈现一定的规律性变化^[41]。设施温室在蔬菜生产过程中,很大程度上克服了气候对土壤的影响。研究发现,在高山地区,随着海拔升高,地表温度逐渐降低,植物凋落物等难以分解,土壤有机质相对较低^[50-52];而植物对土壤养分的供给远大于吸收量,往往使得全量氮、磷、钾养分在不断累积^[50]。青藏高原特殊的高寒气候,随着海拔梯度升高,温度不断降低会抑制土壤动物、微生物的活动^[52],进而抑制枯枝落叶的分解,限制了植被吸收。这也就造成了该区土壤有机质相对较低,同时氮、磷、钾含量较丰富。设施温室复种指数高,肥料施用量高于大田耕地。因此,高海拔地区设施农地耕作更易改变区域土壤环境,大田耕地土壤环境则依然受控于高程对水热再分配的作用,两者对高程响应的效应不同产生了土壤质量的差异。本次实验也发现随着海拔梯度增加,设施农地土壤质量下降幅度更大。地形作为土壤形成发育的一个空间条件,在土壤与环境之间进行物质、能量交换的过程中,深刻影响着土壤整体质量的变化^[17, 39]。地形中坡度和坡向会影响土壤接受日照的时间,造成土壤温度差别,从而对水热条件产生影响^[39]。设施温室和大田耕地往往进行土地平整,一定程度上减少了坡度的影响。而在河谷的阳坡,接受太阳辐射的时间较长,温度较高,有利于作物生长。本研究发现设施农地位于阳坡的土壤质量普遍较高;而且随着坡向从阳坡转变为阴坡,大田耕地与设施农地水热差异增加,使得土壤质量变化呈增大趋势。

3.2 设施农地土壤质量变化因子探讨

研究区的设施农地土壤质量下降普遍受到含盐量、速效钾养分和镉含量变化的影响。研究认为,设施农地土壤盐分累积、养分和重金属含量升高主要是由于设施农业高复种指数下,大量施用化学肥料^[45-46]。依据《拉萨统计年鉴》提供的农业化肥施

用量和农用地播种面积数据^[53]计算得知, 拉萨市化肥施用量从 2011 年的 16 563 t 下降至 2018 年的 10 800 t, 相应的农用地亩均化肥施用量从 436.95 kg·hm⁻² 下降至 218.55 kg·hm⁻², 下降了 49.97%, 过量施肥的情况得到缓解。但该区设施农地复种指数为 3~5 次, 使得设施农地化肥施用量远高于大田耕地。所以, 设施农地土壤盐分累积和镉含量高是土壤整体质量变化的原因。此外, 研究普遍认为该地区耕地不缺乏钾类养分, 并且耕地土壤不注重补充钾^[54]。2018 拉萨市钾肥施用量为 208 t^[53], 这些钾肥可能大多流向设施农地, 使得速效钾养分增加, 影响设施农地土壤质量变化。

研究表明, 设施农地的生产管理方式是影响其土壤质量的重要因素^[55], 今后的研究工作中, 有必要分析针对海拔、坡向等自然因子和种植年限、化肥、农药等人为因子之间的交互作用, 以期揭示设施农地土壤质量变化的机理。

4 结 论

拉萨河谷设施农地和本底土壤综合质量指数分别为 0.36、0.43, 两者 80% 的样地土壤质量等级均匀分布在 V~III 级; 海拔 3 700~3 750 m 距河流 930 m 以内的阳坡地带, 设施农地土壤质量相对较高。相较大田耕地, 设施农地 SQI 平均下降了 16.28%, 且存在明显空间差异。其中堆龙德庆区土壤质量下降最明显, 平均降低了 74.46%。在不同深度上, 0~10 cm 范围内土壤质量下降最明显, 平均下降了 6.5%。随着海拔增加和阳坡转变为阴坡, 设施农地土壤质量变化程度呈增大趋势。针对设施农地土壤质量变化状况, 进行因子分析发现, 全区设施农地土壤质量变化普遍受到含盐量、速效钾和镉含量变化的影响, 三者解释力均可达到 20% 以上。

参考文献 (References)

- [1] Liu S L, Fu B J, Liu G H, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 137—143. [刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137—143.]
- [2] Huang Y, Yang Z F. Recent research progress of overseas soil quality evaluation[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 130—136. [黄勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 130—136.]
- [3] Lu W H, Zhang N M, Bao L, et al. Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J]. Soils, 2020, 52(4): 651—658. [卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651—658.]
- [4] Lu W H, Liu J, Zhang N M, et al. Accumulation characteristics and risk prediction of Cu and Zn contents in typical facility soils in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 189—196. [卢维宏, 刘娟, 张乃明, 等. 中国典型设施栽培土壤 Cu、Zn 累积特征及风险预测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 189—196.]
- [5] Sun J, Gao H B, Tian J, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(4): 594—604. [孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 594—604.]
- [6] Li D P, Wu Z J, Liang C H, et al. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 192—197. [李东坡, 武志杰, 梁成华, 等. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192—197.]
- [7] Williams C H, David D J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants[J]. Soil Science, 1976, 121(2): 86—93.
- [8] Magán J J, Gallardo M, Thompson R B, et al. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9): 1041—1055.
- [9] Topcuoğ L B. Assessment of heavy metal contamination in groundwaters, greenhouse soils and greenhouse crops of gazipaşa region (Turkey) [C]. International Academy of Engineers(IA-E)June 10-11, 2015 Antalya(Turkey).
- [10] Han J P, Luo Y H, Yang L P, et al. Acidification and salinization of soils with different initial pH under greenhouse vegetable cultivation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(10): 1683—1692.
- [11] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, et al. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(4): 2976—2986.
- [12] Huang X, Li T X, Yu H Y. Risk assessments of heavy metals in typical greenhouse soils[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 833—839. [黄霞, 李廷轩, 余海英. 典型设施栽培土壤重金属含量变化及其风险评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 833—839.]

- [13] Yao C X. Environmental effect of fertilizer employing on dry farmland in Shanghai suburbs[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005. [姚春霞. 上海市郊旱作农田化肥施用的环境影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.]
- [14] Meng H G, Li Z, Liu Y J, et al. Investigation on characteristics of greenhouse soils in Shenyang region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31 (2): 70—72. [孟鸿光, 李中, 刘乙俭, 等. 沈阳城郊温室土壤特性调查研究[J]. 土壤通报, 2000, 31 (2): 70—72.]
- [15] Liu L, Lu J Y, Zhang Z W, et al. Heavy metals contamination in greenhouse soils and vegetables in Guanzhong, China[J]. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences, 2014, 4 (3): 80—88.
- [16] Bai L Y, Zeng X B, Su S M, et al. Heavy metal accumulation and source analysis in greenhouse soils of Wuwei District, Gansu Province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (7): 5359—5369.
- [17] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1060—1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1060—1070.]
- [18] Zhao H X, Li B, Liu Y H, et al. The soil properties along landscape heterogeneity on different scales in Huangfuchuan Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (8): 2010—2018. [赵海霞, 李波, 刘颖慧, 等. 皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状[J]. 生态学报, 2005, 25 (8): 2010—2018.]
- [19] Guo X D, Fu B J, Chen L D, et al. Effects of land use on soil quality in a hilly area—A case study in Zunhua County of Hebei Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56 (4): 447—455. [郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响—以河北省遵化市为例[J]. 地理学报, 2001, 56 (4): 447—455.]
- [20] Zhang W, Chen H S, Wang K L, et al. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39 (9): 1828—1835. [张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39 (9): 1828—1835.]
- [21] Zhang M. Spatial variance of agricultural soil quality and its influencing factors in the loess hilly-gully regions—A case study of gaoqu township, Mizhi County, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Northwest University, 2020. [张敏. 黄土丘陵沟壑区农业土壤质量空间分异及影响因素研究——以陕西省米脂县高渠乡为例[D]. 西安: 西北大学, 2020.]
- [22] Gong Z J. The characteristics of cultivated land quality and its spatial variation in Wanzhou district of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [龚竹娟. 三峡库区万州耕地质量特征及空间分异研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [23] Song G, Li D, Liang H O, et al. The characteristics of cultivated land quality and its spatial variation in black soil region of Songnen high plain—A case study of Bayan County in Heilongjiang Province[J]. Economic Geography, 2012, 32 (7): 129—134. [宋戈, 李丹, 梁海鸥, 等. 松嫩高平原黑土区耕地质量特征及其空间分异——以黑龙江省巴彦县为例[J]. 经济地理, 2012, 32 (7): 129—134.]
- [24] Zhao L, Wang Q, Li F C, et al. Spatial differentiation characteristics of soil fertility in the dry valley of the upper Minjiang River based on soil quality index[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31 (3): 48—54, 94. [赵丽, 王青, 李富程, 等. 基于 SQI 的岷江上游干旱河谷肥力空间分异特征[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31 (3): 48—54, 94.]
- [25] Gong D Q, Wang Z F, Zhang Y L. Spatial-temporal variation characteristics of greenhouse-vegetable land in Lhasa of Tibet from 2008 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (13): 233—241. [宫殿清, 王兆锋, 张懿铨. 2008—2018 年拉萨市温室蔬菜地时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (13): 233—241.]
- [26] Wei H, Lv C H, Liu Y Q, et al. Spatial distribution and temporal changes of facility agriculture on the Tibetan Plateau[J]. Resources Science, 2019, 41 (6): 1093—1101. [魏慧, 吕昌河, 刘亚群, 等. 青藏高原设施农业分布格局及变化[J]. 资源科学, 2019, 41 (6): 1093—1101.]
- [27] Pan J L, Dai W N, Wang X M, et al. Changes of soil characteristics in vegetable greenhouse with different years in contrast with local agricultural and pasture land in Tibetan region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (4): 912—917. [潘剑玲, 代万安, 王喜明, 等. 西藏高寒地区不同年限设施蔬菜土壤理化性质变化及与农田、草地土壤的对比分析[J]. 土壤通报, 2013, 44 (4): 912—917.]
- [28] Wang Z F, Gong D Q, Zhang Y L. Investigating the effects of greenhouse vegetable cultivation on soil fertility in Lhasa, Tibetan Plateau[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30 (3): 456—465.
- [29] Gong D Q, Wang Z F, Zhang Y L. Characteristics of the spatial pattern of greenhouse land in Lhasa[J]. Plateau Science Research, 2020, 4 (1): 47—55. [宫殿清, 王兆锋, 张懿铨. 拉萨市设施农地空间格局特征分析[J]. 高原科学研究, 2020, 4 (1): 47—55.]
- [30] Zhang Y L, Wang C L, Bai W Q, et al. Alpine wetlands in the Lhasa River Basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20 (3): 375—388.

- [31] Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment I. Definition of soil quality and evaluation methods [J]. *Soils*, 1997, 29 (3): 113—120. [赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29 (3): 113—120.]
- [32] Zhang X Y, Chen L D. The progress and prospect of soil quality indicators and evaluation methods[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13 (3): 30—34. [张心昱, 陈利顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J]. *水土保持研究*, 2006, 13 (3): 30—34.]
- [33] Zhang W S, Li X X, Huang W J, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (12): 311—318. [张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (12): 311—318.]
- [34] Zheng Q, Wang H J, Dong T Y, et al. Evaluating soil quality of the cotton fields in oasis of Xinjiang using different methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (3): 90—98. [郑琦, 王海江, 董天宇, 等. 基于不同评价方法的绿洲棉田土壤质量综合评价[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38 (3): 90—98.]
- [35] National Soil Survey Office. Soil survey technology in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992. [全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.]
- [36] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. [生态质量部. 土壤质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[M]. 北京: 中国科学出版社, 2018.]
- [37] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24 (1): 107—127.
- [38] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116—134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72 (1): 116—134.]
- [39] Hai C X, Chen J F. Soil geography[M]. Beijing: Science Press, 2010. [海春兴, 陈健飞. 土壤地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [40] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1051—1059. [沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1051—1059.]
- [41] Li X P, Li S J, Wang S P, et al. Research on farming land soil fertility in “one river and two streams areas” in Tibet[J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1997, 25 (2): 60—64. [李新平, 李素俭, 王社平, 等. 西藏“一江两河”地区耕种土壤肥力状况研究[J]. *西北农业大学学报*, 1997, 25 (2): 60—64.]
- [42] Zhang F R. Hydrochemical characteristics of Lhasa River Basin and source apportionment of heavy metals in water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. [张凤熔. 拉萨河流域水化学特征及水体重金属源解析[D]. 天津: 天津大学, 2018.]
- [43] Zhang Q H, Sun P G, He S Y, et al. Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa river basin, Tibet[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (3): 1065—1075. [张清华, 孙平安, 何师意, 等. 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, 39 (3): 1065—1075.]
- [44] Hou C Q, Wu X B, Li Z Q, et al. Application of the geochemical mineralization energy field method to extraction of lead-zinc geochemical anomalies in the Lhasa-Zedang area, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49 (6): 1123—1129. [侯春秋, 巫晓兵, 李泽琴, 等. 地球化学矿化能量场法提取拉萨-泽当地区铅锌矿致化探异常[J]. *地质与勘探*, 2013, 49 (6): 1123—1129.]
- [45] Shi J, Zhang N M, Bao L. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (7): 787—794. [史静, 张乃明, 包立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (7): 787—794.]
- [46] Tian T, Tian Y Q, Gao L H. Research progress on soil quality of protected vegetable fields[J]. *China Vegetables*, 2021, 41 (10): 35—44. [田恬, 田永强, 高丽红. 设施菜田土壤质量研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021, 41 (10): 35—44.]
- [47] Huang S W, Gao W, Tang J W, et al. Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (4): 965—977. [黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (4): 965—977.]
- [48] Duan Y H, Shi J, Zhang N M, et al. Accumulation of heavy metals and its influential factors in greenhouse soils[J]. *Soils*, 2008, 40 (3): 469—473. [段永蕙, 史静, 张乃明, 等. 设施土壤重金属污染物累积的影响因素分析[J]. *土壤*, 2008, 40 (3): 469—473.]
- [49] Lu Z Y. Soil distribution characteristics, physical and chemical properties in Lhasa valley[J]. *Forest Resources Management*, 2017, 46 (4): 117—123. [卢泽洋. 拉萨河谷土壤分布特征及主要土壤类型的理化性质分析[J]. *林业资源管理*, 2017, 46 (4): 117—123.]

- [50] Zhang Y L. Study of cropland soil quality and carbon stock in eastern Qinghai-Tibetan Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018. [张亚丽. 青藏高原东部农田土壤质量与土壤碳库研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [51] Liu X, Wang Y B, Lü M X, et al. Soil quality assessment of alpine grassland in permafrost regions of Tibetan Plateau based on principal component analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40 (3): 469—479. [刘鑫, 王一博, 吕明侠, 等. 基于主成分分析的青藏高原多年冻土区高寒草地土壤质量评价[J]. *冰川冻土*, 2018, 40 (3): 469—479.]
- [52] Yuan F, Deng C J, Tang J, et al. Contributions and influencing factors of soil fauna to litter decomposition under different land-use patterns[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (2): 568—576. [袁访, 邓承佳, 唐静, 等. 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物的分解作用及影响因素[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (2): 568—576.]
- [53] Statistics Bureau of Lhasa. Lhasa statistical yearbook[M]. Beijing: Fangzhi Publication Press, 2019. [拉萨市统计局. 拉萨统计年鉴[M]. 北京: 方志出版社, 2019.]
- [54] Li P. Study on nutrient structure and balance of “one river and two streams” agro-ecosystem in Tibet[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011, 43 (3): 73—75, 78. [李萍. 西藏“一江两河”农业生态系统养分结构分析及平衡研究[J]. *山东农业科学*, 2011, 43 (3): 73—75, 78.]
- [55] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (3): 603—616. [张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (3): 603—616.]

(责任编辑: 檀满枝)