

城市公园海绵型绿地土壤有机碳含量 特征及其影响因素

于芳, 杨钙仁, 邓汶, 胡诗怡, 黄子容

(广西大学 林学院 广西森林生态与保育重点实验室

广西高校亚热带人工林培育与利用重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: [目的] 研究城市海绵型绿地土壤固碳特征及其影响因素, 为城市绿地规划与管理提供科学依据。[方法] 以南宁市 3 个公园的海绵型(雨水花园、净水梯田、植草沟 3 种样式)与常规型(常规乔灌草复层绿地、常规草坪 2 种样式)绿地为对象, 分析两大类各种汇集径流碳氮磷含量、绿地凋落物现存量以及 0—20 cm 土层土壤有机碳含量。[结果] ①海绵型绿地的汇水面积/绿地面积比值以及源自径流输入的有机碳和氮磷量均大于常规型绿地; 海绵型与常规型绿地间凋落物现存量无显著差异。②除雨水花园 0—5 cm 土层土壤自然含水量显著高于其他样式绿地外, 海绵型各样式绿地 0—5 cm 土层土壤的自然含水量、容重和孔隙度与常规型绿地的差异未达到显著水平。③雨水花园、植草沟 0—20 cm 土层土壤有机碳平均含量分别为 7.73 和 10.69 g/kg, 分别为常规型乔灌草复层绿地和草坪的 1.33 和 2.20 倍; 净水梯田的土壤有机碳含量与常规型乔灌草复层绿地无显著差异; 海绵型绿地土壤有机碳含量随建成年限增长呈不断增加趋势, 汇水面积/绿地面积、径流碳磷含量、凋落物有机碳含量等是海绵型绿地土壤有机碳含量的主要影响因子。[结论] 海绵化改造有利于城市绿地土壤固碳, 通过外部径流输入汇集更多有机碳是海绵型绿地土壤碳增汇的主要机制。

关键词: 土壤碳含量; 汇水面积/绿地面积; 海绵型绿地; 绿地样式

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0268-10

中图分类号: S714.2, S688.4

文献参数: 于芳, 杨钙仁, 邓汶, 等. 城市公园海绵型绿地土壤有机碳含量特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 268-277. Yu Fang, Yang Gairen, Deng Wen, et al. Characteristics of soil organic carbon content and influencing factors in sponge green spaces of urban parks [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 268-277. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.026; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.026.

Characteristics of soil organic carbon content and influencing factors in sponge green spaces of urban parks

Yu Fang, Yang Gairen, Deng Wen, Hu Shiyi, Huang Zirong

(Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation,

Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory for Cultivation and Utilization of Subtropical

Forest Plantation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of soil carbon sequestration and its influencing factors of urban sponge green space were analyzed to provide a scientific basis to urban green spaces and urban green space planning and management. [Methods] Three parks in Nanning City were selected as study sites, focusing on sponge-type green spaces (rain gardens, water purification terraces, and grass swales) and conventional green spaces (multilayered tree-shrub-grass green spaces and conventional lawns). The carbon, nitrogen, and phosphorus contents in runoff collected from the green spaces, the existing litter stock, and the soil organic carbon content in the 0—20 cm soil

收稿日期: 2024-12-04

修回日期: 2025-01-26

采用日期: 2025-02-07

资助项目: 广西壮族自治区重点研发计划项目“城市公园水体污染原位与异位生态防治关键技术研究与应用示范”(桂科 AB22080103)

第一作者: 于芳(1997—), 女(瑶族), 广西壮族自治区河池市人, 硕士研究生, 研究方向为自然保护地管理与生态修复技术。Email: yufang97626@163.com。

通信作者: 杨钙仁(1976—), 男(汉族), 广西壮族自治区贵港市人, 博士, 教授, 主要从事森林生态水文与水质效应、面源污染生态修复、生态农业等方面的研究。Email: yanggr@gxu.edu.cn。

layer were analyzed. [Results] ① The ratio of catchment area to green space area and the amounts of organic carbon, nitrogen, and phosphorus inputs from runoff were greater in sponge-type green spaces than in conventional green spaces. However, there was no significant difference in litter stocks between sponge-type and conventional green spaces. There were no statistically significant differences in the natural water content, bulk density, or porosity in the 0—5 cm soil layer between sponge-type and conventional green spaces. ② Except for the natural water content in the 0—5 cm soil layer of rain gardens, which was significantly higher than that of other types of green space. ③ The average soil organic carbon content in the 0—20 cm soil layer of rain gardens and grass swales was 7.73 g/kg and 10.69 g/kg, respectively, which was 1.33 and 2.20 times that of conventional multilayered tree-shrub-grass green spaces and lawns, respectively. The soil organic carbon content of water purification terraces showed no significant difference from that of conventional multilayered green spaces. The soil organic carbon content of sponge-type green spaces increased with age of the green space. The ratio of catchment area to green space area, carbon and phosphorus content in runoff, and organic carbon content in litter were the main factors influencing soil organic carbon content in sponge-type green spaces. [Conclusion] Sponge-type transformation was beneficial for soil carbon sequestration in urban green spaces. The primary mechanism for increased soil carbon sequestration in sponge-type green spaces is the collection of more organic carbon through external runoff.

Keywords: soil carbon content; catchment area/green space area; sponge green space; patterns of green spaces

温室气体的大量排放导致了大气中CO₂浓度持续升高,引发全球性气候变暖等一系列严峻的环境问题,绿地生态系统因其具备固碳功能,在缓解气候变暖方面发挥着重要作用。随着城镇化水平的不断提高,城市绿地在地球生态系统中的面积比例日益增大,城市绿地土壤碳库及其动态变化愈发受到关注。相较于其他自然生态系统,城市绿地土壤碳循环及固持方面的研究相对滞后。目前城市绿地土壤碳循环的研究主要聚焦于林地、草坪、绿化带等常规型绿地,涵盖了土壤呼吸特征、土壤碳储量特征及其影响因素、土壤微生物与土壤碳循环的相关性,以及基于区域城市碳管理的土壤碳管理措施等领域^[1]。关于海绵型绿地土壤碳循环的研究还鲜见报道。

土壤碳库大小取决于碳输入与输出之间的动态平衡关系,受多种因素影响。水分是影响土壤有机碳含量的关键因素之一,适宜的水分条件下,植物光合作用增强,植被生物量增长快,凋落物归还量随之增多,从而为土壤有机碳库提供了更多的有机物质来源^[2];另一方面,过多的水分会填充土壤孔隙,形成厌氧环境,抑制土壤微生物的好氧呼吸作用,降低土壤有机碳的分解矿化速率,有利于土壤有机碳的积累与保存^[3]。土壤养分显著影响植物生物量^[4]和凋落物量,而凋落物量是影响土壤碳平衡的关键因素,比如,施肥可较大幅度提高园林植物生长量^[5]和凋落物量。凋落物性质是影响其分解矿化速率和土壤有机碳库动态的重要因素^[6],而凋落物性质又受植物种类组成影响^[7]。海绵型绿地在土壤水分、径流与养分

汇集、植物种类结构等诸多方面与常规型绿地存在较大差异,现已证实,海绵型绿地雨水花园、植草沟等能够有效削减地表径流量和氮磷含量^[8],而所削减的水分和养分被截留在海绵型绿地土壤中。水分、养分、植物群落结构等差异如何影响城市绿地土壤有机碳库,目前对此研究还不够深入。

南宁市是中国首批海绵城市建设试点城市,目前该市已建有较大面积海绵型绿地,那考河湿地公园是其中的典型代表。2017年4月20日中国国家领导人在南宁市考察那考河生态综合整治项目时,要求相关部门探索更多的包括海绵化在内的生态治理经验。本研究以南宁市3个湿地公园的典型海绵型绿地为对象,分析海绵型和常规型不同样式绿地土壤有机碳含量,旨在明确两大类型绿地土壤有机碳含量差异及其主要影响因素,为深入认识城市绿地固碳特征以及城市绿地规划与管理提供科学依据。

1 研究区概况

广西壮族自治区南宁市(107°19′—109°38′E, 22°12′—24°02′N),属于南亚热带季风气候区,夏长高温多雨,冬短温暖干燥;年太阳总辐射量为111.9×4.18 kJ/(m²·a);年平均日照时数为1 827 h;年平均气温21.6℃;年降水量为1 304.2 mm;平均海拔高度为76.5 m。本研究在南宁市城区选取那考河、沙江河和北湖北3个湿地公园作为研究区,这3个公园建成年份分别为2017,2019和2022年。建园前,河道狭

窄,河两岸主要为疏林坡地、旱作地或作废弃物堆放场地等,经整形整地等改造后,各公园分别形成了不同的绿地单元,并统一覆盖相同或相近土壤、种植相

应植物。3个公园内现有绿地类型主要为海绵型(植草沟、雨水花园、净水梯田)和常规型(常规草坪、常规乔灌木复层绿地)(图1)。

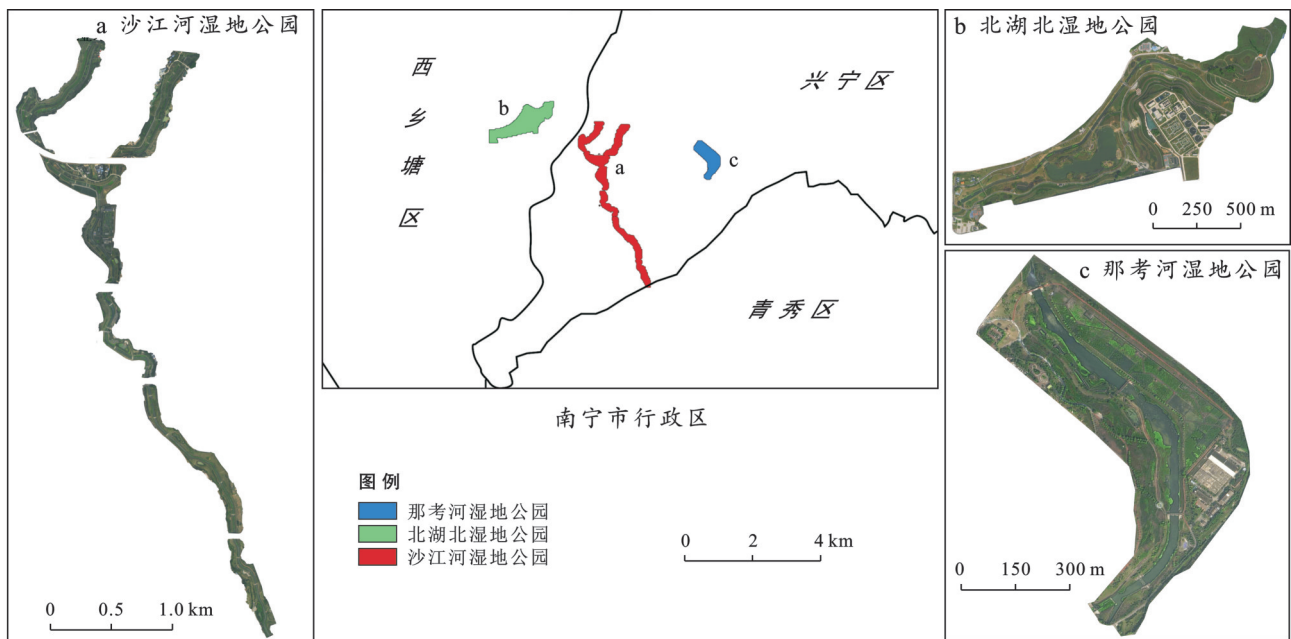


图1 南宁市3个湿地公园分布及其景观

Fig.1 Landscapes and distribution of three wetland parks in Nanning City

2 研究方法

2.1 样地选取

在3个湿地公园中,分别选取存在较多外部径流汇入,且乔木主要为羊蹄甲(*Bauhinia purpurea* L.)、落羽杉(*Taxodium distichum*)、榕树(*Ficus microcarpa* L.)等,灌木主要为翠芦莉(*Ruellia simplex*)、朱蕉(*Cordyline fruticosa*)等,草本主要为美人蕉(*Canna indica* L.)、风车草(*Cyperus involucratus*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris* L.)等的雨水花园(图2a),以及乔木主要为羊蹄甲、桂花(*Osmanthus fragrans*)等,灌木主要为翠芦莉、夹竹桃(*Nerium oleander* L.)、朱蕉等,草本主要为粉黛乱子草(*Muhlenbergia capillaris* Trin.)、麦冬(*Ophiopogon bodinieri*)等的多层级净水梯田(图2b),作为海绵型乔灌木绿地(图2c);选取无明显外部径流汇入,且乔木主要为桂花、榕树、黄花风铃木(*Handroanthus chrysanthus*)等,灌木主要为翠芦莉、朱槿(*Hibiscus rosa-sinensis* L.)等,草本主要为美人蕉、芦苇(*Phragmites australis*)、麦冬等的绿地作为常规型乔灌木复层绿地(图2d);选取有明显汇流排水功能、草本皆为结缕草(*Zoysia japonica*)的植草沟,作为海绵型草坪绿地;选取无明显外部径流汇入,草本皆为结缕草的草坪,作为常规型草坪绿地(图2e)。其中,沙江河湿地公园没有净水梯田。

2.2 样品采集

于2024年6月中旬的中到大雨时期,在每个公园的各样式绿地中分别各选取3块采样地。在1次降雨后期,于各样式绿地内径流汇集处,使用水样采集瓶采集200 ml汇流水样。各样点采集1次,采集后全部密封带回实验室进行过滤,在2~3 d内完成径流水样碳、氮、磷指标的测定。于2024年7月,在每个公园的各样式绿地中分别各选取3块采样地。在每个样地地面随机布置3个1 m×1 m样方,收集样方内全部凋落物,带回实验室后,在75℃下烘干至恒重,称重。随后研磨粉碎,过0.23 mm网筛后备用。于2023年6—7月,在每个公园的各样式绿地中分别各选取3块采样地。在雨水花园、乔灌木复层绿地、草坪样地内采用“品”字形分别设置1 m×1 m小样方各3个,在植草沟样地内分别设置1 m×5 m的长方形样方各3个,在净水梯田的上、中、下坡各设置3个1 m×1 m小样方。采用5点采样法(植草沟采用S形采样法,相邻采样点间距1 m)分层(0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm)采集各样式绿地中小样方0—20 cm土层土壤混合样,带回实验室进行剔除杂物、风干、磨碎、过0.15 mm网筛等预处理,用于有机碳含量分析;同时在混合样采样点附近采集0—5 cm土层土壤环刀样,用于自然含水量、容重等分析。同时记录采样点坐标、绿地

坡度等信息,使用无人机拍摄各绿地平面图像,通过计算机图像处理软件计算各绿地平面投影面积与

径流汇集面积。共计3个公园,5种绿地样式,54个采样地。



图2 3个湿地公园中各种类型绿地景观

Fig.2 Various landscape patterns of green spaces at three wetland parks

2.3 指标测试方法

水样总有机碳、总氮通过燃烧法(德国耶拿 multi N/C2100 总有机碳总氮分析仪)进行测定^[9];水样总磷通过钼酸铵分光光度法测定^[10]。凋落物总有机碳通过燃烧法(德国耶拿 multi N/C2100 总有机碳总氮分析仪)进行测定^[11];凋落物现存量通过称量凋落物烘干后重量获得。土壤含水率、土壤容重及土壤孔隙度通过烘干法进行测定^[12];土壤总有机碳通过燃烧法(德国耶拿 multi N/C2100 总有机碳总氮分析仪)进行测定^[13]。

2.4 计算方法

汇水面积与绿地面积比值(下文简称汇流比):

$$i = S_0 / S_l \quad (1)$$

式中: i 为汇流比; S_0 为绿地径流汇集面积(m^2); S_l 为绿地平面投影面积(m^2)。

凋落物有机碳现存量:

$$L_{cm} = L_m \cdot L_c / 1\ 000 \quad (2)$$

式中: L_{cm} 为有机碳现存量(g/m^2); L_m 为凋落物现存量(g/m^2); L_c 为凋落物现存量有机碳含量(g/kg)。

2.5 数据分析

运用Excel 2023软件对测试获得的数据进行计算、整理。使用SPSS 26.0软件进行数据统计分析,其中,采用单因素方差分析法,检验不同样式绿地

间的土壤有机碳含量差异显著性,采用斯皮尔曼分析法分析各影响因素与土壤有机碳含量及土壤理化性质的相关性;利用Origin 2022软件进行图表绘制。

3 结果与分析

3.1 不同样式绿地汇流比及径流碳氮磷含量

由表1可以看出,5种绿地样式中汇流比范围在1.00~16.90。海绵型绿地、常规型绿地在3个公园中的汇流比范围分别在1.20~16.90和1.00~1.12。其中,雨水花园汇流比平均值达到 2.01 ± 0.58 ,相较于乔灌木复层绿地高1.87倍;植草沟汇流比平均值为 13.77 ± 10.81 ,相较于草坪高13.77倍,且差异达到显著水平($p < 0.05$)。净水梯田呈阶梯结构,径流由上层向下层逐层渗流,其汇流比平均值为 1.20 ± 0.08 ,径流汇集能力强于常规型绿地,却弱于雨水花园、植草沟。5种绿地样式中径流有机碳、总氮、总磷平均含量分别处于 $26.92 \sim 56.70$ mg/L, $1.19 \sim 3.40$ mg/L, $0.06 \sim 0.87$ mg/L范围内。在3个公园中的测定结果中,径流有机碳含量均存在海绵型绿地(雨水花园、植草沟、净水梯田)高于常规型绿地(乔灌木复层绿地、草坪),但差异未达到显著水平($p > 0.05$);雨水径流总氮、总磷输入含量无明显规律。

表 1 不同样式绿地汇流比及径流碳氮磷含量

Table 1 Convergence ratio, and carbon, nitrogen and phosphorus content of runoff at green spaces in different patterns

公园名称	绿地样式	汇入面积/绿地面积	有机碳含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
那考河公园	雨水花园	1.70 ± 0.27^b	36.64 ± 4.94^a	3.40 ± 3.76^a	0.14 ± 0.09^a
	植草沟	15.36 ± 17.11^a	41.61 ± 12.86^a	1.19 ± 0.40^b	0.28 ± 0.07^a
	净水梯田	1.20 ± 0.08^b	32.39 ± 12.88^a	1.42 ± 0.98^b	0.40 ± 0.37^a
	乔灌草复层绿地	1.05 ± 0.08^b	32.27 ± 7.86^a	1.24 ± 0.51^b	0.26 ± 0.29^a
	草坪	1.00 ± 0.00^b	32.05 ± 10.00^a	1.23 ± 0.12^b	0.35 ± 0.44^a
北湖北公园	雨水花园	1.94 ± 0.41^b	56.70 ± 11.34^a	2.08 ± 0.49^a	0.43 ± 0.42^a
	植草沟	16.90 ± 4.55^a	49.43 ± 5.21^{ab}	1.76 ± 0.11^{bc}	0.26 ± 0.21^{ab}
	净水梯田	1.20 ± 0.08^b	26.92 ± 13.47^c	2.02 ± 0.87^a	0.06 ± 0.01^b
	乔灌草复层绿地	1.12 ± 0.11^b	46.32 ± 15.83^{ab}	1.31 ± 0.17^c	0.33 ± 0.37^a
	草坪	1.00 ± 0.00^b	44.39 ± 14.09^b	2.27 ± 1.02^a	0.24 ± 0.16^{ab}
沙江河公园	雨水花园	2.39 ± 0.76^b	48.34 ± 17.29^a	1.41 ± 0.77^a	0.35 ± 0.08^b
	植草沟	9.06 ± 5.23^a	44.89 ± 7.80^a	1.67 ± 0.26^a	0.87 ± 0.12^a
	乔灌草复层绿地	1.07 ± 0.10^b	50.72 ± 10.86^a	1.26 ± 0.13^a	0.24 ± 0.03^c
	草坪	1.00 ± 0.00^b	50.87 ± 16.36^a	1.51 ± 0.67^a	0.23 ± 0.11^c

注:①数据为平均值±标准差;②不同小写字母表示同一公园内不同样式间差异显著($p < 0.05$)。下同。

3.2 不同样式绿地凋落物现存量、有机碳含量及有机碳现存量

由表 2 可以看出,5 种绿地样式凋落物现存量均值处于 $0.99 \sim 100.64 \text{ g/m}^2$ 。在 3 个公园中,雨水花园、净水梯田与乔灌草复层绿地的凋落物现存量均值分别为 $15.32 \pm 6.87 \text{ g/m}^2$, $62.18 \pm 32.29 \text{ g/m}^2$ 和 $69.48 \pm 23.22 \text{ g/m}^2$;植草沟与草坪的凋落物现存量均值分别为 $5.19 \pm 2.32 \text{ g/m}^2$ 和 $2.90 \pm 2.43 \text{ g/m}^2$ 。雨水花园、净水梯田、乔灌草复层绿地的凋落物平均现存量显著高于植草沟、草坪($p < 0.05$)。凋落物有机碳含量均值在 $344.25 \sim 400.67 \text{ g/kg}$,在 3 个公园中,雨水花园、净水梯田与乔灌草复层绿地的凋落物有机碳含量均值分别为 $387.28 \pm 27.39 \text{ g/kg}$, $344.94 \pm 31.33 \text{ g/kg}$ 和 $381.89 \pm 21.74 \text{ g/kg}$;植草沟与草坪的凋落物有机碳含量均值分别为 $391.69 \pm 17.07 \text{ g/kg}$ 和 $385.51 \pm 6.34 \text{ g/kg}$ 。各绿地设施间凋落物有机碳含量呈现海绵型绿地(雨水花园、植草沟)高于常规型绿地(乔灌草复层绿地、草坪)的规律,但差异未达显著水平($p > 0.05$)。凋落物有机碳现存量均值为 $0.39 \sim 34.11 \text{ g/m}^2$,在 3 个公园中,雨水花园、净水梯田与乔灌草复层绿地的有机碳现存量均值分别为 $5.91 \pm 2.76 \text{ g/m}^2$, $20.50 \pm 14.05 \text{ g/m}^2$ 和 $26.20 \pm 7.68 \text{ g/m}^2$;植草沟与草坪的有机碳现存量均值分别为 $2.03 \pm 0.92 \text{ g/m}^2$ 和 $1.10 \pm 0.90 \text{ g/m}^2$ 。雨水花园、净水梯田、乔灌草复层绿地的凋落物有机碳平均现存量显著高于植草沟、草坪($p < 0.05$)。

3.3 不同样式绿地 0—5 cm 土壤含水率、土壤容重及孔隙度

由表 3 可知,5 种绿地样式中的 0—5 cm 土壤平均含水率在 $10.12\% \sim 54.39\%$ 范围内,平均容重在 $1.01 \sim 1.64 \text{ g/cm}^3$ 范围内,土壤孔隙度则在 $38.16\% \sim 61.76\%$ 。3 个公园中,雨水花园 0—5 cm 土壤含水率均值为 $35.39\% \pm 12.02\%$,土壤容重均值为 $1.34 \pm 0.14 \text{ g/cm}^3$,土壤孔隙度均值 $49.24\% \pm 5.45\%$;相较于乔灌草复层绿地,其含水率平均提高了 1.74 倍,容重平均降低了 8.35%,孔隙度平均提高了 0.11 倍。植草沟的 0—5 cm 土壤含水率均值为 $16.07\% \pm 5.44\%$,土壤容重均值为 $1.34 \pm 0.11 \text{ g/cm}^3$,土壤孔隙度均值 $49.10\% \pm 3.91\%$;相较于草坪,其含水率平均高出 0.35 倍,容重平均降低了 10.96%,孔隙度平均提高 0.13 倍。净水梯田的 0—5 cm 土壤平均含水率均值为 $13.87\% \pm 4.30\%$,平均容重均值为 $1.48 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$,土壤孔隙度均值为 $44.29\% \pm 3.14\%$,与乔灌草复层绿地无明显差异。

3.4 不同样式绿地土壤总有机碳含量特征

由图 3 可知,5 种绿地土壤有机碳整体含量均值处于 $1.20 \sim 9.65 \text{ g/kg}$ 。在 3 个公园的雨水花园、植草沟 0—20 cm 土壤剖面的土壤有机碳平均含量分别为 $7.73 \pm 6.17 \text{ g/kg}$ 和 $10.69 \pm 7.99 \text{ g/kg}$,为常规型乔灌草覆层绿地和草坪的 1.33 和 2.20 倍。其中那考河公园的雨水花园土壤有机碳平均含量最高,为 $13.21 \pm 7.81 \text{ g/kg}$,是相同公园中乔灌草复层绿地土壤平均

碳含量的1.77倍;沙江河公园的植草沟含量土壤有机碳平均含量最高,为 16.84 ± 9.65 g/kg,是草坪土壤平均有机碳含量的3.63倍。净水梯田在0—20 cm土壤剖面中的土壤有机碳平均含量与其他样式绿地土壤无显著差异。按建园时间排序,那考河公园、沙江河公园、北湖北公园中雨水花园相较于乔

灌草复层绿地的土壤有机碳含量均值分别高出5.96, 0.19和-0.11 g/kg,植草沟相较于草坪的土壤有机碳含量均值分别高出0.56, 12.20和4.70 g/kg。在土壤的垂直剖面上,土壤的有机碳含量随着土层增加呈下降趋势,各样式绿地土壤有机碳剖面分布无明显差异。

表2 不同样式绿地凋落物现存量、有机碳含量及有机碳现存量

Table 2 Litter stock, organic carbon content and organic carbon stock at green spaces in different patterns

公园名称	绿地样式	凋落物现存量/(g·m ⁻²)	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	有机碳现存量/(g·m ⁻²)
那考河公园	雨水花园	8.57 ± 2.84^b	385.46 ± 34.08^a	3.39 ± 1.37^b
	植草沟	3.19 ± 0.83^b	400.41 ± 37.63^a	1.27 ± 0.31^b
	净水梯田	100.64 ± 59.82^a	344.25 ± 20.08^b	34.11 ± 19.41^a
	乔灌草复层绿地	87.05 ± 25.36^a	379.46 ± 23.84^a	32.53 ± 7.85^a
	草坪	3.06 ± 1.49^b	390.84 ± 5.03^a	1.19 ± 0.57^b
北湖北公园	雨水花园	19.27 ± 14.68^b	390.63 ± 24.83^a	7.29 ± 5.38^b
	植草沟	5.26 ± 1.80^b	386.04 ± 9.69^a	2.05 ± 0.75^b
	净水梯田	23.73 ± 4.57^b	345.62 ± 42.58^b	6.90 ± 8.69^b
	乔灌草复层绿地	68.80 ± 31.19^a	384.19 ± 4.30^a	26.34 ± 11.78^a
	草坪	4.66 ± 5.51^b	365.02 ± 2.91^{ab}	1.71 ± 2.03^b
沙江河公园	雨水花园	18.14 ± 3.10^b	385.75 ± 23.27^a	7.04 ± 1.51^b
	植草沟	7.13 ± 4.32^c	388.61 ± 3.89^a	2.77 ± 1.68^c
	乔灌草复层绿地	52.58 ± 13.12^a	382.02 ± 37.07^a	19.73 ± 3.41^a
	草坪	0.99 ± 0.28^c	400.67 ± 11.07^a	0.39 ± 0.11^d

表3 不同绿地样式0—5 cm土壤土壤含水率、土壤容重及孔隙度

Table 3 Soil moisture content, soil bulk density and porosity of 0—5 cm soil at green spaces in different patterns

公园名称	绿地样式	含水率/%	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度
那考河公园	雨水花园	54.39 ± 21.27^a	1.01 ± 0.27^b	61.76 ± 10.12^a
	植草沟	14.88 ± 3.97^b	1.20 ± 0.07^{ab}	54.76 ± 2.67^{ab}
	净水梯田	14.22 ± 4.77^b	1.41 ± 0.10^a	46.76 ± 3.95^b
	乔灌草复层绿地	13.19 ± 1.48^b	1.36 ± 0.23^a	48.55 ± 8.76^b
	草坪	12.75 ± 2.24^b	1.38 ± 0.13^a	47.86 ± 5.04^b
北湖北公园	雨水花园	25.17 ± 3.62^a	1.54 ± 0.08^a	42.06 ± 3.07^a
	植草沟	19.25 ± 8.41^{ab}	1.49 ± 0.15^a	43.81 ± 5.49^a
	净水梯田	13.51 ± 3.83^{bc}	1.54 ± 0.06^a	41.82 ± 2.32^a
	乔灌草复层绿地	12.49 ± 4.08^{bc}	1.53 ± 0.19^a	42.24 ± 6.99^a
	草坪	10.12 ± 2.96^c	1.64 ± 0.13^a	38.16 ± 5.08^a
沙江河公园	雨水花园	26.61 ± 11.18^a	1.47 ± 0.07^a	43.91 ± 3.17^a
	植草沟	14.09 ± 3.93^b	1.35 ± 0.11^b	48.74 ± 3.58^a
	乔灌草复层绿地	13.08 ± 0.61^b	1.49 ± 0.03^{ab}	42.63 ± 2.26^a
	草坪	12.96 ± 1.62^b	1.51 ± 0.08^{ab}	44.62 ± 5.72^a

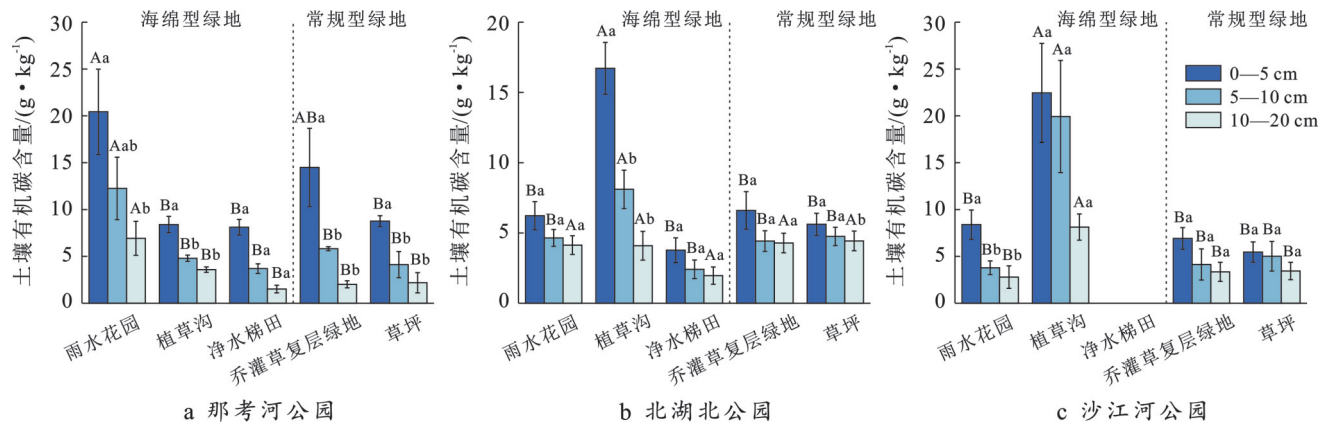
3.5 土壤有机碳含量与影响因素相关性分析

由图4可以看出,径流碳输入与凋落物碳输入均为影响土壤有机碳含量的外源环境因素,在海绵型绿地生态系统中与土壤有机碳含量存在显著相关性。其

中,汇流比与土壤总有机碳含量的相关系数最高,呈极显著正相关($p < 0.01$);径流有机碳、磷含量与土壤总有机碳含量也均呈显著正相关($p < 0.01$),且径流有机碳、总磷含量与土壤容重呈显著正相关($p < 0.05$)。

凋落物现存量、凋落物有机碳现存量与土壤有机碳含量呈极显著负相关($p < 0.01$);凋落物有机碳含量与土壤有机碳含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与土壤水分含量也呈正相关($p < 0.05$)。常规型绿地土壤有机碳含量相关性分析结果显示,径流、凋落物的相关指标对常规型绿地土壤有机碳含量的影响不明

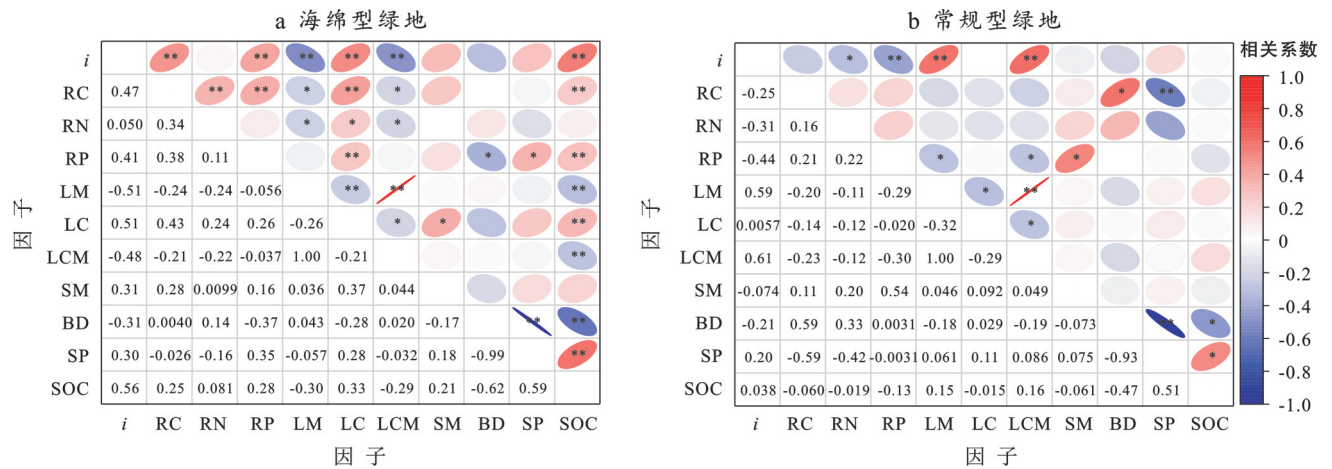
显。在土壤物理性质方面,海绵型绿地的土壤有机碳含量与土壤容重呈极显著负相关($p < 0.01$),与土壤总孔隙度呈极显著正相关($p < 0.01$),与土壤含水率无显著相关性。常规型绿地中,土壤有机碳含量与土壤理化性质中的土壤容重呈显著负相关($p < 0.05$),与土壤总孔隙度呈极显著正相关($p < 0.05$)。



注:不同大写字母表示同一土层不同绿地样式间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一绿地样式不同土层间差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同绿地样式土壤有机碳含量

Fig.3 Soil organic carbon contents at green spaces in different patterns



注:①*代表 $p < 0.05$,**代表 $p < 0.01$ 。②*i*代表汇水面积/绿地面积,RC, RN, RP分别代表径流 TOC、径流 TN、径流 TP;LM, LC, LCM分别代表凋落物现存量、凋落物 TOC、凋落物有机碳现存量;SM, BD, SP, SOC分别代表土壤含水率、土壤容重、土壤总孔隙度、土壤 TOC。

图 4 绿地土壤有机碳含量与影响因素相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between soil organic carbon content and influencing factors at green spaces in different patterns

4 讨论

4.1 绿地凋落物现存量的主要影响因素

本研究发现,海绵型雨水花园的凋落物现存量低于常规型乔灌木复层绿地,这可能是由于雨水花园中的凋落物产量更高、腐解作用更剧烈所产生的结果,凋落物产量、腐解量与凋落物现存量密切相关。相关研究^[4]表明,合适的水分与养分条件可以促使植被生物量的增加,进而间接地推动植被凋落物产量的提升。因此,从海绵型绿地与常规型绿地对

径流的蓄存能力强弱来看,海绵型绿地的植被凋落物产量应高于常规型绿地,与本研究的设想一致。海绵型绿地特有的间歇淹水环境能通过淋溶作用加速凋落物降解^[14]。在高水分环境下,凋落物内部的水溶性易分解有机物质更易析出,致使凋落物迅速失重^[15]。另一方面,适宜的环境湿度以及外来养分可以提升微生物生物量,增强与凋落物分解相关的酶活性,降低凋落物中难降解物质和元素的含量^[16],间接提升凋落物的分解效率。海绵型绿地间歇淹水的环境也在一定程度上避免由于土壤含水率过高而

出现的土壤生物氧气供给受阻等^[17]问题。其他研究证实,干旱条件会对植物造成严重的环境胁迫,导致绿地的初级净生产力下降,进而对凋落物产量造成负面影响^[18];同时,干旱通过改变的凋落物性质,对分解者产生胁迫作用,也影响了凋落物分解速率^[19]。以上研究与本研究中对海绵型绿地凋落物分解速率高于常规型绿地的设想基本一致。综上所述,在凋落物产生与腐解的动态变化过程中,海绵型绿地与常规型绿地在植被凋落量与腐解量方面存在显著差异。由于凋落物现存量是植被腐解作用的最终呈现结果,因此可能出现常规型绿地凋落物现存量高于海绵型绿地的情况。相关研究^[7]表明,不同植被类型下的凋落物腐解效率受到物种组成的影响显著。植被种类以及植株部位的差异会导致凋落物基质质量的不同,进而对后续的机械破碎、微生物分解等关键环节产生影响^[20]。但在本研究样地选取中,雨水花园与乔灌木复层绿地、植草沟与草坪的植被配置与生物量并不完全相同,这在一定程度上对研究结果造成了干扰。

4.2 绿地土壤有机碳含量的主要影响因素

本研究发现,海绵型绿地与常规型绿地在径流汇集面积上的差异直接导致了汇入径流养分、凋落物养分输入的不同,进而影响土壤有机碳含量及土壤容重等性质。这与其他研究中^[21]雨水花园等设施对径流的调控、净化效果基本相符,但本研究明确了外来养分对海绵型绿地土壤有机碳含量的影响。其中,外源养分的输入极有可能通过刺激土壤微生物活性,从而提升土壤有机碳含量。通常情况下,微生物为满足自身需求,可能在一定程度上促进了土壤有机质分解^[22];但在同等条件下,相较于土壤现存有机质而言,土壤微生物会优先利用可用性高、易分解的外源有机质^[23]。径流养分的输入恰好直接为微生物提供了这类外源有机质。而绿地凋落物有机质能够以溶解态、分解残留物、微生物转化产物和微生物残体等多种形式进入土壤^[24],间接为微生物提供外源易分解有机质。这一过程抑制了土壤有机碳的矿化,引起负激发效应^[25]。此外,输入土壤的部分有机碳沉积为土壤养分,被用于供给植被生长^[26],而较高的植被丰富度促进了区域碳循环,进一步推动土壤有机碳含量的提高^[27],形成良性循环;而常规型绿地因汇流面积小、人类活动干扰大,不利于径流汇集与凋落物分解,导致碳源流失与土壤板结,进而影响有机碳的固存。因此,从理论上来说,汇流面积相对较大的绿地能够提供更多的外源易分解有机质,进而间接促进土壤有机碳的固存。本研究发现,不同公

园雨水花园相较于乔灌木复层绿地的碳含量增幅大小与其投入运营的时间先后相一致,由高到低依次为那考河、沙江河、北湖北公园。这与以往研究中随着利用年限的增加,土壤有机碳含量也随之增加的规律契合^[28]。由此可知,海绵型绿地的碳汇优势随着利用年限的增长将愈发显著。但在对比净水梯田、植草沟与乔灌木复层绿地、草坪的碳含量增加幅度时,本研究并未观察到类似规律。这可能与所选公园利用年限较短、土层经人为干扰后仍处于紊乱状态有关^[29]。此外,人类活动对土壤有机碳含量影响显著。如绿地的施肥、修剪等管护措施干预了植物的自然生长过程,改变了土壤质地,直接或间接影响了土壤有机碳含量^[30],对本研究造成一定影响。

5 结论

在0—20 cm的土层中,海绵型绿地(雨水花园、植草沟)土壤固碳效果优于常规型绿地(乔灌木复层绿地、草坪),且随公园运营年限增加,海绵型绿地的碳汇优势将愈发明显。绿地土壤有机碳含量受多种因素影响,海绵型绿地的下凹型构造利于径流汇集和凋落物积累、促进凋落物分解,通过增加养分输入的方式促进区域碳循环。其中,汇水面积/绿地面积、径流碳/磷含量、凋落物有机碳含量等是影响海绵型绿地土壤有机碳含量的主要因子;常规型绿地汇流面积小,受人类活动干扰大,不利于土壤有机碳固存。

参考文献(References)

- [1] 叶红,黎慧娟.城市土壤碳循环特征研究进展[J].生态环境学报,2009,18(3):1134-1138.
Ye Hong, Li Huijuan. Progress in research on urban soil carbon cycle [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1134-1138.
- [2] 周晓宇,张称意,郭广芬.气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J].应用生态学报,2010,21(7):1867-1874.
Zhou Xiaoyu, Zhang Chengyi, Guo Guangfen. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1867-1874.
- [3] 滕伯敏,李丛笑,张天昱,等.不同水淹梯度下河漫滩湿地土壤有机碳特征及其影响因子[J].环境科学学报,2023,43(8):362-371.
Teng Yimin, Li Congxiao, Zhang Tianyu, et al. Characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in floodplain wetland under different flooding gradients [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(8): 362-371.

- [4] 刘冠成,黄雅曦,王庆贵,等.环境因子对植物物种多样性的影响研究进展[J].中国农学通报,2018,34(13):83-89.
Liu Guancheng, Huang Yaxi, Wang Qinggui, et al. Effects of environmental factors on plant species diversity: Research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(13):83-89.
- [5] 田地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682-713.
Tian Di, Yan Zhengbing, Fang Jingyun. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021,45(7):682-713.
- [6] 张晓曦,田爽,曾磊,等.北方常见绿化树种凋落物添加对城市土壤有机碳组成特征的影响[J].植物科学学报,2024,42(2):140-149.
Zhang Xiaoxi, Tian Shuang, Zeng Lei, et al. Effects of litter addition from common greening tree species in northern China on organic carbon composition characteristics of urban soils [J]. Plant Science Journal, 2024,42(2):140-149.
- [7] 许晓静,张凯,刘波,等.森林凋落物分解研究进展[J].中国水土保持科学,2007,5(4):108-114.
Xu Xiaojing, Zhang Kai, Liu Bo, et al. Review on litter decomposition in forest ecosystems [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(4):108-114.
- [8] 龙岩,刘珂璇,张子怡,等.低影响开发设施的水文与水环境效应评估[J].水电能源科学,2024,42(6):54-58.
Long Yan, Liu Kexuan, Zhang Ziyi, et al. Assessment of hydrological and water environmental effects of low impact development facilities [J]. Water Resources and Power, 2024,42(6):54-58.
- [9] 吴启航,崔明超.总有机碳分析仪测定常见水的TOC[J].中国测试,2009,35(3):90-92.
Wu Qihang, Cui Mingchao. Analysis of ordinary water TOC with shimadzu TOC analyzer [J]. China Measurement & Test, 2009,35(3):90-92.
- [10] 国家环境保护总局.水质总磷的测定钼酸铵分光光度法:GB 11893—1989[S].北京:中国标准出版社,2017.
State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Water quality-determination of total phosphorus-ammonium molybdate spectrophotometric method: GB 11893—1989 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [11] 李朝英,郑路.总有机碳分析仪测定植物总有机碳含量的方法[J].江苏农业科学,2017,45(9):155-158.
Li Zhaoying, Zheng Lu. The method for determining the total organic carbon content of plants by using a total organic carbon analyzer [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(9):155-158.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 王巧环,任玉芬,孟龄,等.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J].分析实验室,2013,32(10):41-45.
Wang Qiaohuan, Ren Yufen, Meng Ling, et al. Simultaneous determination of total nitrogen and organic carbon in soil with an elemental analyzer [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2013,32(10):41-45.
- [14] Willcock J, Magan N. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw [J]. Journal of Stored Products Research, 2000,37(1):35-45.
- [15] Joly F X, Kurupas K L, Throop H L. Pulse frequency and soil-litter mixing alter the control of cumulative precipitation over litter decomposition [J]. Ecology, 2017,98(9):2255-2260.
- [16] 杨洋,王继富,张心昱,等.凋落物和林下植被对杉木林土壤碳氮水解酶活性的影响机制[J].生态学报,2016,36(24):8102-8110.
Yang Yang, Wang Jifu, Zhang Xinyu, et al. Mechanism of litter and understory vegetation effects on soil carbon and nitrogen hydrolase activities in Chinese fir forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(24):8102-8110.
- [17] Garcia-Pausas J, Casals P, Romanyà J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: Effects of N content and the moss layer [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004,36(6):989-997.
- [18] Deng Lei, Peng Changhui, Kim D G, et al. Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems [J]. Earth-Science Reviews, 2021,214:103501.
- [19] 徐晨,阮宏华,吴小巧,等.干旱影响森林土壤有机碳周转及积累的研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):195-206.
Xu Chen, Ruan Honghua, Wu Xiaoqiao, et al. Progresses in drought stress on the accumulation and turnover of soil organic carbon in forests [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022,46(6):195-206.
- [20] 万晓华,黄志群,何宗明,等.改变碳输入对亚热带人工林土壤微生物生物量和群落组成的影响[J].生态学报,2016,36(12):3582-3590.
Wan Xiaohua, Huang Zhiqun, He Zongming, et al. Changes of above-and belowground carbon input affected soil microbial biomass and community composition in two tree species plantations in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(12):3582-3590.

- [21] 郭超,谢潇,李家科.城市雨水花园集中入渗对土壤氮、磷、有机碳及重金属的影响[J].水土保持通报,2022,42(1):26-33.
Guo Chao, Xie Xiao, Li Jiake. Influence of concentrated infiltration on soil N, P, organic carbon and heavy metals in urban rain gardens [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):26-33.
- [22] 徐敏,刘苑苑,元晓春,等.氮沉降下不同碳添加模式对亚热带毛竹林土壤激发效应的影响[J].应用生态学报,2022,33(10):2619-2627.
Xu Min, Liu Yuanyuan, Yuan Xiaochun, et al. Effects of different carbon addition modes on the soil priming effect of a subtropical *Phyllostachys edulis* forest under nitrogen deposition [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(10):2619-2627.
- [23] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006,38(4):747-758.
- [24] 苏卓侠,苏冰倩,上官周平.植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J].水土保持研究,2022,29(2):406-413.
Su Zhuoxia, Su Bingqian, Shangguan Zhouping. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):406-413.
- [25] 甘子莹,王浩,丁驰,等.亚热带森林不同植物及器官来源的可溶性有机质输入对土壤激发效应的影响及其作用机理[J].植物生态学报,2022,46(7):797-810.
Gan Ziyang, Wang Hao, Ding Chi, et al. Effects of dissolved organic matter derived from different plant and tissues in a subtropical forest on soil priming effect and the underlying mechanisms [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022,46(7):797-810.
- [26] 张川,杨万勤,岳楷,等.高山森林溪流冬季不同时期凋落物分解中水溶性氮和磷的动态特征[J].应用生态学报,2015,26(6):1601-1608.
Zhang Chuan, Yang Wanqin, Yue Kai, et al. Soluble nitrogen and soluble phosphorus dynamics during foliar litter decomposition in winter in alpine forest streams [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(6):1601-1608.
- [27] Feng Jiguang, He Keyi, Zhang Qiufang, et al. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems [J]. Global Change Biology, 2022,28(10):3426-3440.
- [28] 张青青,伍海兵,梁晶.上海市绿地表层土壤有机碳储量的估算[J].土壤,2020,52(4):819-824.
Zhang Qingqing, Wu Haibing, Liang Jing. Estimation of storage of organic carbon in green surface soils in Shanghai [J]. Soils, 2020,52(4):819-824.
- [29] 冯慧文,张石棋,傅瓦利,等.城市绿地年龄对土壤理化性质的影响:以重庆北碚区为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2012,37(3):96-104.
Feng Huiwen, Zhang Shiqi, Fu Wali, et al. Effects of the age of urban greenbelts on soil physical and chemical properties: A case study of Beibei District of Chongqing [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2012,37(3):96-104.
- [30] 杨帅斌,刘恋.北京市不同功能区土壤黑碳的含量特征及其来源分析[J].地质力学学报,2017,23(6):846-855.
Yang Shuaibin, Liu Lian. Concentration and sources of black carbon in different function zones of Beijing, China [J]. Journal of Geomechanics, 2017,23(6):846-855.

(上接第267页)

- [25] 张鹏,张涛,陈年来.祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J].应用生态学报,2009,20(3):518-524.
Zhang Peng, Zhang Tao, Chen Nianlai. Vertical distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen and related affecting factors along northern slope of Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(3):518-524.
- [26] 潘忠松,丁访军,戴全厚,等.黔南马尾松人工林土壤有机碳的研究[J].中南林业科技大学学报,2012,32(2):75-80.
Pan Zhongsong, Ding Fangjun, Dai Quanhou, et al. Study on soil organic carbon of *Pinus massoniana* Lamb plantation in southern Guizhou Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012,32(2):75-80.
- [27] 杜有新,吴从建,周赛霞,等.庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1675-1681.
Du Youxin, Wu Congjian, Zhou Saixia, et al. Forest soil organic carbon density and its distribution characteristics along an altitudinal gradient in Lushan Mountains of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(7):1675-1681.