

广州市森林公园常绿阔叶林土壤养分特征分析*

林 远 梁 源 陈柳谕 许晴宜 陈小梅

(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要 通过对广州市森林公园(天鹿湖、大夫山、滴水岩、王子山、石门)的常绿阔叶林土壤全碳、全氮、全磷、全铁、全钾、pH 进行测定, 分析土壤养分分布特征。研究发现:(1) 土壤全碳、全钾含量与森林到城市中心的距离均呈显著正相关($P<0.05$), 全铁与距离为显著负相关;(2) 土壤全碳、全磷和全钾含量在不同森林公园间均差异显著, 但全氮($P=0.09$)、全铁($P=0.07$)和 pH($P=0.347$)在不同公园间差异不显著;(3) 森林土壤的全铁含量与全磷具有正相关, 但与全碳、全氮、全钾呈负相关。结果表明: 城市化背景下, 森林公园常绿阔叶林土壤的营养元素含量存在差异, 碳和钾含量随着公园离市中心的距离增加而减少。

关键词 森林公园; 常绿阔叶林; 土壤养分

中图分类号: S174.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2022) 01-0107-06

Soil Nutrients in Evergreen Broadleaved Forest of Suburban Forest Parks in Guangzhou

LIN Yuan LIANG Yuan CHEN Liuyu XU Qingyi CHEN Xiaomei

(School of Geographical Sciences and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Soil samples were collected from five evergreen broad-leaved forests in Guangzhou forest parks (Tianluhu, Dafushan, Dishuiyan, Wangzishan and Shimen) to analyzed the characteristic of soil nutrients including the contents of total carbon (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total iron (Fe), total potassium (TK) and pH range (pH). The results showed:(1) Soil TC and TK contents were significantly positively correlated with the distance from sampling sites to the city center ($P < 0.05$), whereas soil Fe content was negatively correlated with the distance. (2) the contents of TC, TP and TK were significantly different among sites, but soil TN ($P=0.09$) and total Fe contents ($P=0.07$) were not significantly different among sites. (3) The total Fe content in urban forest soil was positively correlated with that of TP, but negatively correlated with that of TC, TN and TK. The results suggest that urbanization could alter soil nutrient contents of evergreen broad-leaved forests in forest parks; especially, both the TC and TK contents significantly decreased with the distance away from the city center.

Key words forest park; evergreen broadleaved forest; soil nutrients

森林公园是以森林自然环境为依托, 具备一定规模和质量的森林风景资源, 可供人们游憩、健身和进行文娱教育等活动的地域^[1]。同时, 森林公园在改善城市生态环境中也发挥重要作用。

基金项目: 广东省科技创新战略专项资金项目——“攀登计划”专项 (pdjh2021b0399), 广州市科技计划 (201804010159), 广州大学大学生创新训练项目 (201911078023)。

第一作者: 林远 (1999—), 男, 在读本科, 研究方向为城市土壤与生态健康, E-mail:1226857968@qq.com。

通信作者: 陈小梅 (1985—), 女, 副教授, 主要从事环境变化与生态系统过程的研究, E-mail:chxm-009@163.com。

截至2018年,全国共建有国家级森林公园897处^[2],而广州市内的森林公园达91个,森林公园管理面临生态环境保护与合理旅游开发双重压力^[3]。城市森林的健康发展极大程度上依赖于城市森林土壤环境。森林土壤是森林生态系统的重要组成部分和环境因子,其养分直接影响了森林的生长^[4]。土壤养分是土壤质量的重要组成部分,也是森林演替的重要影响因素^[5]。但随着旅游业的发展和城市化进程的推进,森林土壤受到人类践踏、垃圾侵入等直接因素的影响。同时在城市化的影响下,局地气候的变化也对森林土壤造成一定的影响^[6]。因此,研究城市森林公园的土壤养分特征,有利于保护生态环境,提高土壤生产力,发挥城市森林公园应有的综合效益,是深入了解城市发展和旅游开发对森林生态系统影响的关键一步。

目前研究发现城市化以及森林公园开发对森林土壤产生一定的消极影响^[7-8]。邓雪倩等^[7]对长春地区某森林公园的研究发现,人类践踏干扰增加了土壤的容重、降低了pH值并减少了有机质含量。习丹等^[8]对广州城郊森林公园的研究中发现,森林公园天然常绿阔叶林土壤有机碳及其组分含量均随土壤深度增加而下降,人类活动对森林公园的干扰直接或间接影响土壤-植被-大气系统碳库的合成与分解,引起土壤养分结构和质量发生改变。何俊杰等^[9]对珠江三角洲森林土壤的研究中发现,郊区森林土壤的碳、氮和磷含量高于城区,城市化改变了森林土壤营养元素结构。不同土壤养分对环境的响应机制也有所不同,通过对土壤不同元素影响因子的探讨,进一步分析城市化对森林土壤的影响。

广州城市历史悠久,是我国改革开放的前沿阵地,自上世纪70年代以来,广州经历了快速城市化阶段,2019年城市化率达86.46%^[10]。受经济发展和城市化推进影响,以广州市政府所在区域——越秀区向外扩展,广州市中心城区、郊区以及远郊区的植被受到不同程度的人为干扰,森林覆盖呈现“中心城区低、周边郊区高”的格局^[11]。广州市森林公园土壤受到一定程度的影响。据此,以天鹿湖、大夫山、滴水岩、王子山和石门等5个森林公园为研究对象,分析常绿阔叶林0~20 cm土壤中的全碳、全氮、全磷、全铁、全

钾、pH,探讨森林公园土壤养分分布特征,为评判城市森林公园生态系统的稳定性提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广州属海洋性亚热带季风气候,地带性植被为亚热带季风常绿阔叶林,地带性土壤主要为在砂岩、页岩和花岗岩母质上发育的赤红壤。

1.2 样地选取

本文以广州市政府所在地为城市中心向外扩展,根据国家标准《中国森林公园风景资源质量评定》中对森林公园的定义^[12],选取了市内县级及以上5个森林公园。具体样地为:天鹿湖森林公园、大夫山森林公园、滴水岩森林公园、王子山森林公园、石门国家森林公园。5个森林样地选取标准为:森林群落为亚热带典型常绿阔叶林;面积不小于1 hm²,距离主干道不小于1 km;在近20年内未受直接、严重的自然或人为干扰。5个样地的概况列于表1。

1.3 样品采集与处理

2019年7月,在上述5个样地中各选取5个5 m×5 m样方,在每个样方用内径10 cm土钻按0~20 cm分层钻取混合土壤样品,每个样品由5次土钻挖取的同层次土壤混合而成,采集后装入已消毒的密封袋中。每个样地采集5个样品,共采集25个样品。去除样品中可见的根系等动植物残体和石块,过2 mm筛,自然风干后备测。

1.4 土壤理化性质测定

土壤pH值用电极电势法测定,水土比为1:2.5;土壤全碳(TC)、全氮(TN)采用Vario EL元素分析仪(Elementar, Hanau, Germany)进行室内测定。土壤全磷、全铁、全钾由广州中科检测技术服务有限公司分别采用土壤全磷测定法(NY/T88-1988)^[13]、土壤全铁测定法(HJ 974-2018)^[14]、土壤全钾测定法(NY/T87-1988)^[15]测定。

1.5 统计分析

采用Excel 2019和SPSS 23.0统计分析软件对数据进行整理,利用单因素方差分析法(LSD法)判断5个不同森林样地土壤全碳、全氮、全磷、全铁、全钾、pH之间的差异;利用Pearson相关系数对土壤全碳、全氮、全磷、全铁、全钾、pH、样地与城中心的距离之间进行相关分析。

表 1 研究样地概况及其森林样地群落特征

Table 1 The general situation and community characteristics of the forest sample plots

参数 Parameters	天鹿湖 Tianluhu	大夫山 Dafushan	滴水岩 Dishuiyan	王子山 Wangzishan	石门 Shimen
与市中心的距离 /km Distance from the city center	18.6	20.5	25.3	48.8	77
经纬度 Latitude and longitude	113.43° E 23.22°N	113.30°E 22.95°N	113.31°E 22.91°N	113.22°E 23.58°N	113.76°E 23.64°N
海拔 /m Altitude	124.50	91.20	112.40	278.20	398.60
坡度 Slope	27.04°	7.44°	22.56°	41.56°	25.51°
土壤类型 Soil type	赤红壤 Latosolic red soil	赤红壤 Latosolic red soil	赤红壤 Latosolic red soil	赤红壤 Latosolic red soil	赤红壤 Latosolic red soil
林龄 /a Forest age	35 以上	35 以上	约 40	约 40	70 以上
郁闭度 /% Canopy density	65~71	75	80	90 以上	90 以上
管理方式 Administration method	风景林 Landscape forest	风景林 Landscape forest	风景林 Landscape forest	自然保护区 / 风景林 Nature reserve / Landscape forest	自然保护区 / 风景林 Nature reserve / Landscape forest
优势种 Dominant species	格木 <i>Erythrophleum fordii</i> 、 中华石楠 <i>Photinia beauverdiana</i> 等	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i> 、 马占相思 <i>Acacia mangium</i> 等	大叶相思, 桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	华润楠 <i>Machilus chinensis</i> ; 荷木 <i>Schima superba</i> 等	华润楠; 锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i> ; 荷木等
面积 /hm ² Area	880	约 600	409	3 200	2 636
公园等级 Park level	省级 Provincial level	县级 Country level	县级 Country level	省级 Provincial level	国家级 National level
行政区 District	黄埔区 Huangpu	番禺区 Panyu	番禺区 Panyu	花都区 Huadu	从化区 Conghua
2019 年平均降水量 /mm Average annual precipitation in 2019	2 462.2	2 060.6	2 060.0	2 136.4	2 281.0

注：市中心指广州市人民政府。

Note: the city center refers to the People's Government of Guangzhou Municipality.

2 结果与分析

2.1 森林公园土壤的理化性质

5 个森林公园样地的土壤全碳含量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1-A)。距离市中心较近的大夫山全碳含量为 $23.52 \pm 5.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是 5 个森林中最低的; 距离市中心最远的石门全碳含量为 $47.68 \pm 7.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是 5 个森林中最高的; 其他样地的全碳含量随市中心距离增加呈增加趋势。森林公园土壤全碳含量与样地距城市中心的距离呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 表 2)。

5 个森林公园样地的土壤全氮含量中 (图

1-B), 距离较远的王子山、石门的全氮含量显著高于距离城市较近的大夫山、滴水岩。近市中心的天鹿湖、大夫山和滴水岩等 3 个森林的土壤全氮含量差异不显著。

5 个森林公园样地的土壤全磷含量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1-C)。天鹿湖和石门样地的土壤全磷含量低于其他 3 个样地的土壤。大夫山的土壤全磷含量最高, 达 $0.73 \pm 0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

5 个森林公园样地的土壤全铁含量变化趋势与土壤全碳的变化趋势相反, 与市中心的距离呈显著负相关关系 ($P < 0.05$, 表 2), 土壤全铁含量随着与市中心距离的增加而减少。距离市中心较近的大

夫山土壤含铁量为 $34.13 \pm 4.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他样地 ($P < 0.05$, 图 1-D)。距离市中心最远的石门森林土壤含铁量最低, 仅 $21.06 \pm 3.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

5 个森林公园样地的土壤全钾含量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1-E), 变化趋势与土壤全碳一致。森林公园样地的土壤全钾含量随着与市中心的距离增加而呈增加趋势, 与市中心的距离呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 表 2)。其中距离市中心最远的石门土壤全钾含量为 $31.44 \pm 2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他样地。

5 个森林公园样地的土壤 pH 值差异不显著 ($P > 0.05$, 图 1-F)。距离市中心较近的大夫山 pH 值最低, 土壤呈微酸性。距离城市最近的天鹿湖与较近的滴水岩 pH 值相近, 土壤呈中性。而距离市中心最远的石门与王子山土壤 pH 值最高。

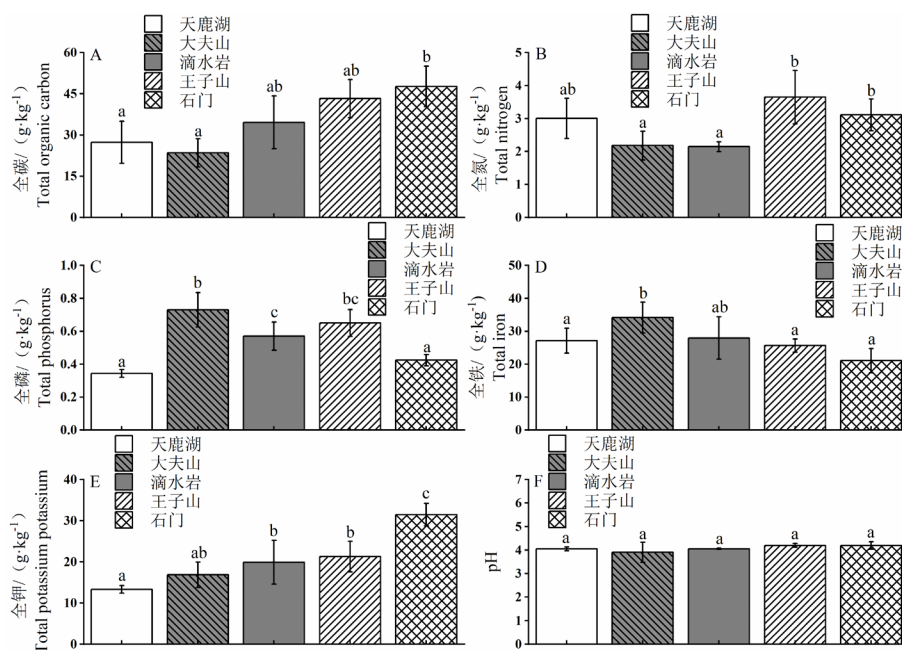
2.2 相关性分析

土壤全碳与全氮、全钾均呈显著正相关, 与全铁呈显著负相关 ($P < 0.05$, 表 2)。土壤全钾含量与 pH 值呈正相关 ($P < 0.05$, 表 2)。土壤全铁与全磷呈正相关, 与全氮、全钾呈负相关 ($P < 0.05$, 表 2)。森林公园到市中心的距离与土壤全碳和全钾含量均呈显著正相关, 而与土壤全铁含量呈显著负相关。

3 结论与讨论

5 个森林公园土壤全碳含量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1-A), 土壤全碳含量随着市中心的距离增加而增加, 这与习丹等^[8]关于城郊森林公园土壤有机碳特征的研究结果一致。森林土壤碳含量不仅受到植被、土壤属性、气候、环境等自然环境的影响, 还受人类活动影响。森林公园的开发给森林带来持续的人为影响。相比于人工次生林, 天然地带性森林对土壤碳稳定具有更强的保护作用^[16]。距离市中心较近的天鹿湖、大夫山等森林公园多为人工次生林, 距离市中心最远的石门为原始次生林, 林龄 70 a 以上。城市森林公园受人为干扰比郊区森林高, 土壤碳库储量随森林郁闭度减少而减少。根据张奇志等^[17]的研究, 长期的旅游活动对森林植物多样性有负相关的干扰作用, 植被多样性减少不利于碳的积累。另外城市热岛效应使城区森林公园环境温度高于郊区, 土壤碳库的周转和分解速度快^[18]。因此, 城市森林公园的开发不利于森林土壤碳库的积累。

从整体趋势上看, 郊区森林公园的土壤全氮含量略高于城区, 这与何俊杰等^[9]对广州市城郊梯度上的森林土壤研究一致。土壤氮含量与微生



注: 不同小写字母表示样地之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different lowercase letters indicate significant differences between samples ($P < 0.05$).

图 1 森林样地土壤全碳、全氮、全磷、全铁、全钾含量及 pH 值

Figure 1 Soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus, total iron, total potassium contents and pH values in the forest sample plots

表 2 森林土壤全碳、全氮、全磷、全铁、全钾含量、pH 值及样地距离的相关分析 (n=19)

Table 2 Correlation analysis of total carbon, total nitrogen, total phosphorus, total iron, total potassium content, pH value and plot distance in forest soil (n=19)

参数 Parameters	全碳 Total organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全铁 Total iron	全钾 Total potassium	pH	距离 Distance
全碳 Total organic carbon		0.568	-0.260	-0.856	0.584	0.339	0.776
全氮 Total nitrogen	*		-0.088	-0.524	0.126	0.158	0.447
全磷 Total phosphorus	ns	ns		0.560	-0.281	-0.402	-0.308
全铁 Total iron	**	*	*		-0.477	-0.277	-0.674
全钾 Total potassium	**	ns	ns	*		0.502	0.878
pH	ns	ns	ns	ns	*		0.413
距离 Distance	**	ns	ns	**	**	ns	

注：上三角为相关性系数，下三角为 P 值，其中 * 表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)；** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)；ns 表示未通过显著性检验 ($P > 0.05$)。

Note: the upper triangle is the correlation coefficient, and the lower triangle is the P value, where * indicates a significant difference ($P < 0.05$). ** indicates that the difference was extremely significant ($P < 0.01$). ns means failed significance test ($P > 0.05$).

物的反硝化作用^[19]、大气氮沉降^[20]等过程密切相关。城区森林的土壤温度相对较高，促进微生物的反硝化作用，使其含氮产物离开内部生物过程，土壤中的氮含量增加^[21]。城区相对剧烈的人类生产、生活活动对氮沉降的影响也更为显著^[22]，氮沉降使土壤微生物组成、pH 值等发生改变的同时，影响土壤氮循环过程，引起土壤氮素的流失。另外土壤氮含量也受土壤有机碳含量、容重的影响^[23]，本研究中土壤全氮与全碳呈正相关关系。这可能由于旅游践踏对森林公园土壤进行压实，减少土壤含水量、有机质^[7]，从而改变微生物活性来影响土壤氮循环，进而影响土壤全氮含量。

5 个森林公园的土壤含磷量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1-C)，但整体含量较低，符合南亚热带森林土壤低含磷量的特征^[24]，这与郑妍等^[25]对华南沿海地区的林地土壤养分研究一致。磷主要来源于岩石分化，受成土母质、土壤生物、植被类型、环境等因素的影响^[26]，属于固体循环。因此磷容易受淋溶作用的影响^[27]，而市中心降雨较郊区集中，土壤磷易受损失。本研究中，大夫山和王子山的土壤含磷量明显高于其他样地，这可能与其降雨情况相关^[28]。在 2019 年大夫山及王子山所在区的降水量与其他森林公园所在区相比较少，其中大夫山所在区降水量 (2 060 mm) 明显低于全市平均降雨量 (2 336 mm)，同时其坡度

(7.44°) 相对较小，使其森林土壤受到的淋溶作用相对较弱，土壤磷素径流流失减少。此外王子山森林郁闭度 (90% 以上) 较高，植被覆盖率高一定程度上减少了雨水土壤的直接淋洗，减少磷素的径流流失^[29]。另外，本研究中土壤全磷和土壤全铁呈正相关关系，土壤游铁、活性铁含量的增加会增强土壤对磷的吸附能力^[30]。

森林土壤全铁主要以矿物质态的形式存在，其含量主要受成土母质影响，处于相对稳定的状态^[31]。本研究森林公园土壤的全铁含量与土壤全碳、到市中心的距离呈显著负相关关系 ($P < 0.05$, 图 1-D; $P > 0.05$, 表 2)。土壤中的铁在一定程度上会受到土壤腐殖质层中的富里酸的抑制作用^[32]。土壤全碳含量随距离增加而增加，从而间接影响土壤全铁。

5 个森林公园的土壤全钾含量差异明显 ($P < 0.05$, 图 1-E)，增长趋势与土壤全碳相一致，并与土壤全碳、距离有显著正相关关系。全钾为易溶元素，土壤含水量的增加造成土壤钾素的扩散与稀释^[33]，城市中心的温湿度上升，土壤水分增加，溶解土壤中的钾素。在本研究中，土壤钾素与全铁呈负相关关系，与 pH 值呈正相关关系。钾与其他离子间存在拮抗作用^[34]，其中包含 Fe^{2+} ，且土壤 pH 值会影响土壤钾的吸附量^[35]， H^+ 与 K^+ 相互竞争，因此土壤 pH 增加有利于钾的吸附。

广州市森林公园土壤全碳、全钾、pH 随森林

公园到城市中心的距离增加而增加,不同养分之间存在一定的相关关系。城市化背景下,森林土壤的营养成分发生变化,部分土壤营养元素在森林土壤中的含量减少,关于城市森林土壤营养元素对城市化的响应规律仍需结合微生物等相关因素进一步研究。

参考文献

- [1] 宋蒙华. 珠三角地区森林公园微型化发展策略分析[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(4): 98-101.
- [2] 张建龙. 中国林业和草原统计年鉴2018[M]. 北京: 中国林业出版社, 2018: 4-5.
- [3] 黄秀娟, 林秀治. 我国森林公园旅游效率及其影响因素[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 137-146.
- [4] 陶晓, 俞元春, 张云彬, 等. 城市森林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 88-96.
- [5] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 156-166.
- [6] 王宝强, 李萍萍, 沈清基, 等. 上海城市化对局地气候变化的胁迫效应及主要影响因素研究[J]. 城市发展研究, 2019, 26(9): 107-115.
- [7] 邓雪倩, 夏奇. 践踏胁迫对低山丘陵地带森林公园土壤环境的影响[J]. 长春工业大学学报, 2019, 40(3): 228-233.
- [8] 习丹, 旷远文. 广州城郊森林公园常绿阔叶林土壤有机碳及组分特征[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 226-232.
- [9] 何俊杰, 陈小梅, 冯思红, 等. 城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 591-596.
- [10] 广州市统计局. 广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 50.
- [11] 段倩雯, 谈明洪. 国内外大城市的城市森林时空变化对比研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 410-419.
- [12] 国家林业局. 中国森林公园风景资源质量等级评定:GB/T 18005-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [13] 中国农业科学院分析测试中心. 土壤全磷测定法:NY/T 88-1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [14] 四川省农业科学院中心实验室. 土壤全钾测定法:NY/T 87-1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [15] 吉林省环境监测中心站. 土壤全铁测定法:HJ/ 974-2018[S]. 中国环境科学出版社, 2019.
- [16] 方运霆, 莫江明, SANDRA B, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142.
- [17] 张奇志. 旅游干扰对南湾国家森林公园植物组成特征的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 105-108.
- [18] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [19] HAN XG, LI LH, HUANG JH, et al. Biogeochemical cycle[M]. Beijing: High Education Press and Springer Press, 1994: 197-222.
- [20] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [21] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126-133.
- [22] HUANG L J, ZHU W X, REN H, et al. Impact of atmospheric nitrogen deposition on soil properties and herb-layer diversity in remnant forests along an urban-rural gradient in Guangzhou, southern China [J]. Plant Ecology, 2012, 213(7): 1187-1202.
- [23] 陈帅, 王效科, 逮非, 等. 城市化对城区和郊区森林土壤氮循环的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 842-848.
- [24] HOULTON B Z, WANG Y P, VITOUSEK P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. Nature, 2008, 454: 327-330.
- [25] 郑妍, 江瑶, 孙冬晓, 等. 华南沿海地区林地土壤养分空间异质性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 110-114.
- [26] YOU C, WU F, YANG W, et al. Nutrient-limited conditions determine the responses of foliar nitrogen and phosphorus stoichiometry to nitrogen addition: A global meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2018, 241(10): 740-749.
- [27] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [28] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005(1): 153-163.
- [29] 贾莉莉, 王龙, 陈剑秋, 等. 土壤磷素径流流失影响因素及减少途径[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(S2): 241-243.
- [30] 熊德中, 刘淑欣. 福建铁铝土磷素吸附与磷肥有效性的探讨[J]. 福建农学院学报, 1990(2): 196-201.
- [31] 冉继伟, 张旭, 宁平, 等. 全国主要土壤铁重金属形态及其与土壤性质的关系[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(4): 1-4.
- [32] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.
- [33] KUCKEUBUCH R, CLAASSEN N, JUNGK A. Potassium availability in relation to soil moisture II. Calculations by means of a mathematical simulation model[J]. Plant and Soil, 1986, 95(2): 233-243.
- [34] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2007(6): 907-913.
- [35] 徐明岗. 恒电荷土壤与可变电荷土壤K⁺的吸附特性[J]. 土壤肥料, 2002(2): 13-17.