

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郑蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化

李柏键^{1,2}, 申聪聪^{1,2}, 刘四义^{1,2}, 吴华勇³, 王继琛^{1,2}, 赵冬辉^{1,2}, 葛源^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 三江源地区是研究土壤生态系统功能响应气候变化的热点区域. 为了研究三江源地区高寒草地土壤剖面功能特征和驱动机制沿发生层的差异, 分析了高寒草地土壤剖面不同发生层的土壤功能指标(包括呼吸、氮转化速率和酶活等)以及与环境因子之间的相关关系. 结果表明, 土壤功能特征在高寒草甸和高寒草原之间不存在显著差异, 表层土相比于深层土具有更高的呼吸、氮转化速率和酶活. 土壤理化性质中全氮含量是不同发生层土壤功能特征的关键驱动因子, 分别解释了土壤功能特征 18.3%、21.4% 和 27.5% 的水平分异. 气候和植被因子主要在表层土中通过改变土壤理化性质间接影响土壤功能, 但是大气氮沉降在深层土中对土壤功能仍存在影响. 结果显示, 三江源地区高寒草地土壤表现出显著的氮受限特征, 为全球气候变化背景下土壤功能多样性的维持和对气候变化的响应提供了新的见解.

关键词: 三江源地区; 土壤剖面; 发生层; 土壤功能; 环境因子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1562-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204032

Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region

LI Bo-jian^{1,2}, SHEN Cong-cong^{1,2}, LIU Si-yi^{1,2}, WU Hua-yong³, WANG Ji-chen^{1,2}, ZHAO Dong-hui^{1,2}, GE Yuan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Three-River Headwaters region is a hotspot for studying the response of soil function to climate change. To study the horizontal variation characteristics of alpine grassland soil function and vertical changes along soil genetic horizons, soil functional indicators (including respiration, nitrogen conversion rate, and enzymatic activity) of different genetic horizons in alpine grassland soil profiles and their correlations with environmental factors were analyzed. The results showed that there were no significant differences in soil functional characteristics between alpine meadows and steppes, and topsoil had higher respiration rates, nitrogen conversion rates, and enzymatic activities than those of subsoil. Total nitrogen was a key driver of soil functional characteristics in different genetic horizons, explaining 18.3%, 21.4%, and 27.5% of the horizontal variation in functional characteristics, respectively. Climate and vegetation factors mainly affected soil function indirectly by changing soil physicochemical properties in topsoil, but atmospheric nitrogen deposition still affected soil function in subsoil. These results indicate the significant nitrogen limitation of alpine grassland soil in the Three-River Headwaters region, and the findings provide a new insight into the maintenance of soil functional diversity and the response to climate change in the context of global climate change.

Key words: Three-River Headwaters region; soil profile; genetic horizon; soil function; environmental factors

土壤呼吸、氮转化速率和胞外酶活性等变量是涉及物质循环和能量流动的关键土壤特性, 可以作为土壤碳固存能力、土壤养分储存能力和土壤肥力的衡量指标^[1]. 土壤呼吸是土壤中微生物和植物根系等产生 CO₂ 的通量, 是土壤温室气体排放的主要来源^[2]. 土壤氮循环中氮素的矿化和硝化过程是维持土壤氮素有效性的关键过程. 土壤中微生物产生的胞外酶在有机质矿化分解和矿质元素循环迁移等过程中扮演重要角色^[3]. 一系列生物和非生物因素会影响土壤的功能特性, 例如土壤的 pH、养分的有效性、微生物的群落组成、地上植被、气温和降水等^[4-7]. 随着全球变暖, 土壤呼吸强度预期会有明显的提升, 影响陆地生态系统的碳固存^[8]. 关于高寒

草地氮转化的研究表明, 模拟增温、增雨和氮沉降等对土壤氮转化过程有一定影响^[9,10]. 同时, 微生物会在资源受限的情况下减少胞外酶的分泌^[5]. 三江源地区地处青藏高原腹地, 是长江、黄河和澜沧江的源头, 河流众多, 沼泽密布, 被誉为“中华水塔”^[11]. 该地区大面积的高寒草地是全球高寒生态系统的重要组成部分, 是全球气候变化研究的热点区域. 气候变暖和人类活动带来的降水格局变化、氮沉降增强和草地退化等将对三江源地区

收稿日期: 2022-04-02; 修订日期: 2022-06-05

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目 (2019QZKK0306, 2019QZKK0308)

作者简介: 李柏键 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物生态学, E-mail: bojianli521@163.com

* 通信作者, E-mail: yuange@rcees.ac.cn

土壤生态系统功能产生根本性的影响^[9,12]. 之前关于三江源地区高寒草地土壤功能的研究多集中于土壤表层,忽略了不同发生层的土壤功能对于环境变化的差异化响应^[13]. 因此探究三江源地区土壤功能在不同发生层的水平格局及其影响因子的变化有助于加深对高寒草地土壤功能多样性格局的理解,并为预测土壤生态系统功能对全球变化的多元化响应提供科学参考.

本研究在三江源地区典型的高寒草地分布区域挖掘了土壤剖面,通过主坐标分析、相关分析和冗余分析等统计方法,研究高寒草地土壤剖面发生层相关功能指标及其主要的影响因子沿发生层的变化,探讨不同环境因子对于 3 个发生层土壤功能特征的差异化影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与土壤样品采集

土壤样本取自我国的三江源地区,研究范围为:北纬 32. 83° ~ 36. 72°,东经 96. 35° ~ 102. 29°,海拔范围为 2 800 ~ 4 400 m,年平均气温为 -3. 6 ~ 3. 9℃,年平均降水量为 290 ~ 835 mm,属于典型的青藏高原气候系统,主要的植被类型为高寒草地,包括高寒草

甸和高寒草原等. 高寒草甸主要植被以小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)和异针茅(*Stipa aliena*)等为优势种. 高寒草原主要植被以青藏苔草(*Carex moorcroftii*)和紫花针茅(*Stipa purpurea*)等为优势种^[14].

采样于 2020 年 8 月 4 ~ 25 日,在三江源地区选择高寒草甸(12 个)和高寒草原(13 个)的典型样点(表 1),挖掘了 25 个土壤剖面(图 1). 根据中国土壤信息系统(soil information system of China, SISChina)

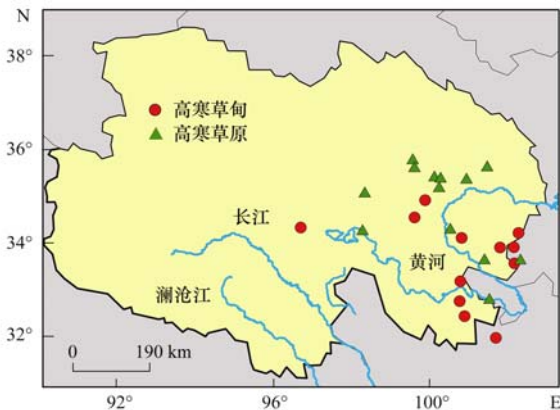


图 1 三江源地区研究区域及土壤剖面样点分布示意

Fig. 1 Study area and soil profiles sites in the Three-River Headwaters region

表 1 草地土壤剖面的基本信息
Table 1 Background data of grassland soil profiles

剖面编号	采样地点	草地类型	氮沉降速率 (NDS) /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	湿润指数 (WI)	NDVI 指数	年平均降水量 (MAP) /mm	年平均气温 (MAT) /℃	发生层 ¹⁾
Q1	青海省同德县	高寒草甸	15.57	16.4	0.86	551	1.0	A + B
Q2	青海省兴海县	高寒草甸	17.6	-0.4	0.72	379	2.9	A + C
Q3	青海省兴海县	高寒草甸	15.35	0.3	0.49	442	-0.3	A + B + C
Q4	青海省曲麻莱县	高寒草甸	13.73	17.3	0.54	370	-3.6	A + C
Q5	青海省甘德县	高寒草甸	17.25	64.6	0.75	651	-1.3	A + B + C
Q6	青海省久治县	高寒草甸	15.49	68.8	0.75	687	-0.4	A + B + C
Q7	青海省久治县	高寒草甸	15.49	68.3	0.69	744	-0.7	A + B + C
Q8	青海省河南县	高寒草甸	15.88	54	0.78	622	-0.2	A + B + C
Q9	青海省泽库县	高寒草甸	14.91	49.1	0.8	594	-0.2	A + B
Q10	甘肃省夏河县	高寒草甸	15.85	29.3	0.85	599	0	A + B + C
Q11	青海省同仁县	高寒草甸	14	10.3	0.75	581	0.9	A + B
Q12	四川省阿坝县	高寒草甸	16.44	58	0.85	835	0.5	A + B + C
Q13	青海省湟源县	高寒草原	24.44	-2.2	0.88	547	1.9	A + B + C
Q14	青海省共和县	高寒草原	17.3	-16.4	0.68	531	1	A + B + C
Q15	青海省同德县	高寒草原	16.01	9.4	0.72	505	2.4	A + B + C
Q16	青海省玛多县	高寒草原	13.02	2.2	0.24	374	-2.2	A + B + C
Q17	甘肃省玛曲县	高寒草原	15.09	85.3	0.79	691	1.2	A + B + C
Q18	甘肃省碌曲县	高寒草原	16.89	47.6	0.82	614	0.3	A + B
Q19	青海省河南县	高寒草原	15.88	47.3	0.76	598	-0.1	A + B + C
Q20	青海省共和县	高寒草原	15.3	-0.4	0.29	379	3.9	A + B
Q21	青海省共和县	高寒草原	15.29	-1.6	0.29	396	2.6	A + B
Q22	青海省共和县	高寒草原	15.3	-0.5	0.3	409	2.8	A + B
Q23	青海省乌兰县	高寒草原	17.94	-23.8	0.17	378	1.6	A + B
Q24	青海省乌兰县	高寒草原	15.37	-18.1	0.23	366	2.0	A + B
Q25	青海省都兰县	高寒草原	11.45	-32.1	0.46	290	1.5	A + B

1) 25 个剖面的所有发生层样品数量合计为 62 个

对剖面土壤类型和发生层进行诊断和分类^[15],将剖面分为表土层 A、芯土层 B 和母质层 C. 3 个土壤发生层在大部分的剖面中均被发现,将每个发生层的土壤均质化并汇集成一个复合土壤样品,总共获得了 62 个土壤样品,见表 1(有土壤剖面的部分发生层缺失).

使用全球定位系统(GPS)收集样点的经纬度和海拔信息,气象背景数据(年平均降水量,mean annual precipitation,MAP;年平均气温,mean annual temperature,MAT;湿润指数,wetness index,WI)和植被归一化指数(normalized difference vegetation index,NDVI)来源于中国科学院资源环境科学数据中心数据库(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=253>,<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257>),大气氮沉降速率(nitrogen deposition rate,NDR)数据来源于国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn/data/meta?id=141884>),使用 ArcGIS 10.4.1 软件进行提取.

1.2 样品测定及统计分析

1.2.1 土壤理化性质测定

土壤含水率(soil moisture content,SMC)是用铝盒烘干法测定的.土壤 pH 是使用 pH 计(FE20-FiveEasy PlusTM,Mettler-Toledo,中国)测量土水比为 1:2.5(质量体积比)的土壤悬浊液的 pH 得到的.使用元素分析仪(Vario EL III,Elementar,德国)测量土壤总碳(total carbon,TC)和总氮(total nitrogen,TN).土壤电导率(electrical conductivity,EC)以土水比 1:5(质量浓度)的比例在 20℃ 振荡提取,然后用电导率仪(FE38-FiveEasy PlusTM,Mettler-Toledo,中国)测定 25℃ 提取液的电导率.土壤中铵态氮(NH_4^+ -N)和硝态氮(NO_3^- -N)含量是使用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提土壤(土水比 1:5),然后通过连续流动分析仪(AA3,SEAL analytical,德国)测定溶液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度,之后根据浸提液体积、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度以及土壤含水率计算土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量.

1.2.2 土壤功能指标测定

土壤基础呼吸(soil basal respiration,SBR)和诱导呼吸(soil induced respiration,SIR)速率是参照 Ge 等^[16]描述的方法,通过评估土壤 CO_2 的产生量来测定的.测定 SBR 的具体流程为:10 g 鲜土在 25℃ 下孵育 48 h,之后使用 Li-820 CO_2 分析仪(LI-COR, Lincoln,美国)测量 24 h 内 CO_2 的累积量.测定 SIR 的流程为:将 10 g 鲜土和 10 mL 无菌酵母浸出物溶液(1.2%,质量分数)在 25℃ 下孵育 4 h 后测定每隔 3 h CO_2 的增量.土壤呼吸速率以 1 g 干土 1 h

CO_2 中 C 的质量计.

土壤氮的矿化速率(mineralization rate,MR)和硝化速率(nitrification rate,NR)的测定参照何芳等^[17]描述的方法,具体流程为:土壤样品置于 25℃ 恒温培养箱中培养 7 d 后,以相同的方法测定土壤中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量.土壤中培养后无机氮(NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N)含量减去初始的无机氮含量再除以培养时间即为 N 的净矿化速率, NO_3^- -N 培养后含量减去初始含量再除以培养时间即为 N 的净硝化速率.

土壤酶活性:测定了土壤脲酶(urease,UA)、蔗糖酶(invertase,IA)、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶(β -1,4-N-acetylglucosaminidase,NAG)和碱性磷酸酶(alkaline phosphatase,ALP)这 4 种胞外酶,其中蔗糖酶参与土壤碳循环,脲酶和 NAG 酶参与土壤氮循环,碱性磷酸酶参与土壤磷循环.脲酶活性是采用靛酚比色法测定的,活性以 24 h 内 1 g 干土 1 h 生成 NH_4^+ -N 的 μg 数计.蔗糖酶活性是采用二硝基水杨酸比色法测定的,活性以 24 h 内 1 g 干土 1 h 生成葡萄糖的 mg 数计.NAG 酶和碱性磷酸酶活性测定参照 Bai 等^[18]描述的方法,通过荧光微孔板法进行测定,0.5 g 鲜土在 25℃ 下培养 3 h 后检测荧光强度并对照底物标准曲线换算得到 1 g 干土 1 h 荧光底物的产生量(nmol)来表征两种酶的活性.

1.2.3 数据统计分析与可视化

在置信水平为 95% 的条件下用单因素方差分析和 Duncan 多重比较来分析土壤理化性质和功能指标在不同草地类型和不同发生层之间的差异.使用主坐标分析(principal coordinate analysis,PCoA)和多元置换方差分析(permutational multivariate analysis of variance,PERMANOVA)比较不同草地类型不同土壤发生层功能特征之间的差异(使用标准化后功能指标的欧氏距离).使用 Pearson 相关分析和冗余分析(redundancy analysis,RDA)研究不同土壤发生层气候植被因子和土壤理化性质与功能指标之间的相关性.利用路径分析探究气候植被因子和土壤理化性质对于不同发生层土壤功能特征的影响.所有数据的统计和可视化均采用 R 4.1.2(<https://www.r-project.org/>)软件完成,部分图表使用 Adobe illustrator CC 2019 进行了优化.

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和功能指标

表 2 显示,两种草地类型土壤的少部分理化性质在相同的发生层存在差异.土壤 pH 整体呈现碱性,且 C 层 pH 更高.TC、TN、 NH_4^+ -N 和

NO₃⁻-N含量均从 A 层到 C 层逐渐下降,而 C/N 逐渐升高. 两种草地类型的 B 层和 C 层土壤水分有效性和养分状况均比较恶劣,在 C 层几乎均没有显著差异.

在 A 层中高寒草甸的土壤功能指标均显著高于高寒草原,而在 C 层中高寒草甸除了脲酶和碱性

磷酸酶活性仍高于高寒草原,其他功能指标均没有显著差异. 这表明草地类型对于土壤功能的影响只集中于 A 层土,对于 C 层土壤功能指标的影响很小. 从 A 层到 C 层,所有的功能指标都出现显著的下降,这表明土壤发生层的改变对于土壤功能特征的影响很大.

表 2 土壤剖面不同发生层的理化特性和功能指标¹⁾
Table 2 Physicochemical properties and functional indicators of different horizons in soil profiles

理化特性及功能指标	草地类型	A 层	B 层	C 层
土壤 pH	高寒草甸	7.99 ± 0.56Ac	8.23 ± 0.59Ab	8.48 ± 0.58Aa
	高寒草原	8.08 ± 0.50Ac	8.3 ± 0.51Ab	8.79 ± 0.49Aa
ω[土壤含水率(SMC)]/%	高寒草甸	44.06 ± 17.95Aa	23.95 ± 6.25Ab	18.34 ± 13.48Ac
	高寒草原	15.72 ± 10.17Ba	15.22 ± 14.14Aa	13.42 ± 12.14Ab
ω[总碳(TC)]/g·kg ⁻¹	高寒草甸	50.97 ± 21.81Aa	17.23 ± 8.13Ab	12.68 ± 10.98Ac
	高寒草原	24.29 ± 8.93Ba	21.65 ± 7.81Ab	20.2 ± 12.09Ab
ω[全氮(TN)]/g·kg ⁻¹	高寒草甸	4.16 ± 1.7Aa	1.26 ± 0.68Ab	0.64 ± 0.52Ab
	高寒草原	1.37 ± 1.13Ba	0.98 ± 0.86Ab	0.88 ± 1.09Ab
碳氮比 C/N	高寒草甸	12.15 ± 1.34Bc	16.05 ± 9.9Bb	21.92 ± 24.13Ba
	高寒草原	30.16 ± 21.08Ac	38.43 ± 37.96Ab	45.23 ± 32.95Aa
土壤电导率 EC/mS·m ⁻¹	高寒草甸	253.8 ± 261.79Ab	573.52 ± 1141.17Aa	253.97 ± 365.93Ab
	高寒草原	137.6 ± 52.9Bb	65.79 ± 41.9Bc	158.19 ± 295.61Ba
ω(NH ₄ ⁺ -N)/mg·kg ⁻¹	高寒草甸	2.41 ± 2.34Aa	1.48 ± 2.04Ab	1.03 ± 0.56Ac
	高寒草原	1.19 ± 0.43Aa	0.81 ± 0.38Ab	0.64 ± 0.39Ac
ω(NO ₃ ⁻ -N)/mg·kg ⁻¹	高寒草甸	11.5 ± 7.33Aa	5.12 ± 9.2Ab	1.79 ± 2.33Ac
	高寒草原	7.43 ± 6.89Ba	3.0 ± 2.82Ab	2.59 ± 3.45Ab
土壤基础呼吸(SBR)/μg·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	0.33 ± 0.17Aa	0.08 ± 0.06Ab	0.06 ± 0.06Ab
	高寒草原	0.12 ± 0.13Ba	0.05 ± 0.06Ab	0.05 ± 0.04Ab
土壤诱导呼吸(SIR)/μg·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	3.33 ± 0.9Aa	1.59 ± 0.43Ab	1.28 ± 0.91Ab
	高寒草原	2.21 ± 1.03Aa	1.38 ± 0.64Ab	1.36 ± 0.43Ab
脲酶(UA)/μg·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	67.72 ± 40.87Aa	19.78 ± 35.68Ab	14.84 ± 25.12Ac
	高寒草原	21.34 ± 26.21Ba	11.02 ± 8.8Bb	4.34 ± 3.7Bc
蔗糖酶(IA)/mg·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	3.75 ± 1.51Aa	0.76 ± 0.69Ab	0.6 ± 0.53Ab
	高寒草原	1.47 ± 1.25Ba	0.71 ± 0.3Ab	0.38 ± 0.11Ab
β-1,4-N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶(NAG)/nmol·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	13.43 ± 5.75Aa	9.77 ± 6.79Ab	5.8 ± 3.82Ac
	高寒草原	8.85 ± 4.5Ba	7.3 ± 5.2Ab	6.69 ± 4.06Ab
碱性磷酸酶(ALP)/nmol·(g·h) ⁻¹	高寒草甸	257.17 ± 128.07Aa	77.82 ± 58.21Ab	66.52 ± 110.47Ab
	高寒草原	118.55 ± 94.92Ba	66.6 ± 115.58Ab	20.23 ± 15.63Bc
净矿化速率(MR)/mg·(kg·d) ⁻¹	高寒草甸	6.62 ± 6.89Aa	3.96 ± 12.58Ab	0.83 ± 6Ac
	高寒草原	3.92 ± 5.02Ba	1.21 ± 1.12Bb	0.61 ± 1.24Ac
净硝化速率(NR)/mg·(kg·d) ⁻¹	高寒草甸	7.3 ± 6.17Aa	4.39 ± 11.52Ab	0.5 ± 3.13Ac
	高寒草原	2.29 ± 5.62Ba	0.39 ± 0.99Bb	0.1 ± 0.82Ac

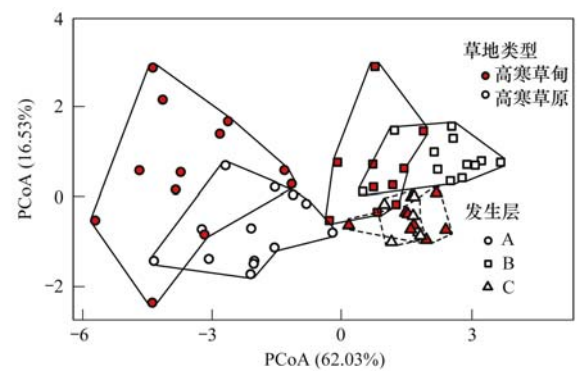
1) 数值后面字母为 Duncan 多重比较的检验结果,不同大写字母表示两种草原类型同一土壤发生层之间存在显著差异($P < 0.05$),不同小写字母表示同一种草原类型不同土壤发生层之间存在显著差异($P < 0.05$)

2.2 土壤功能特征随草地类型和土壤发生层的变异
PCoA 分析(图 2)和对功能特征差异的 PERMANOVA 检验(表 3)结果表明,不同草地类型土壤功能特征整体上不存在显著差异($P = 0.075$). 两种草地类型土壤功能特征在 A 层中存在显著差异($P < 0.05$),在 B 层中差异边缘显著($P = 0.048$),而在 C 层中没有显著差异($P = 0.797$). 同时,土壤功能特征在不同的发生层中差异显著($P = 0.003$),尤其是在 A 层和 C 层之间土壤功能特征的差异最为显著(R^2 为 0.473 和 0.472; $P < 0.001$),

相反的,在 B 层和 C 层之间差异不显著(P 为 0.376 和 0.986).

2.3 环境因子对土壤功能特征的影响沿发生层的变化

Pearson 相关分析的结果表明(图 3),在 3 个发生层中 pH 和 MAT 几乎与所有的功能指标均不相关. 土壤理化性质中的 SMC、TC 和 TN 在 3 个发生层中几乎与所有的功能指标都呈现显著的正相关关系($P < 0.05$). 相反的,C/N 在 A 层和 B 层与大部分的功能指标呈现显著的负相关关系. 土壤的



实线连接的样点分组表示不同草地类型土壤剖面相同发生层之间存在显著差异,虚线连接表示不存在显著差异($P < 0.05$)

图2 不同草地类型土壤发生层功能特征的主坐标分析

Fig. 2 Principal coordinate analysis of soil genetic horizon functional characteristics in different grassland types

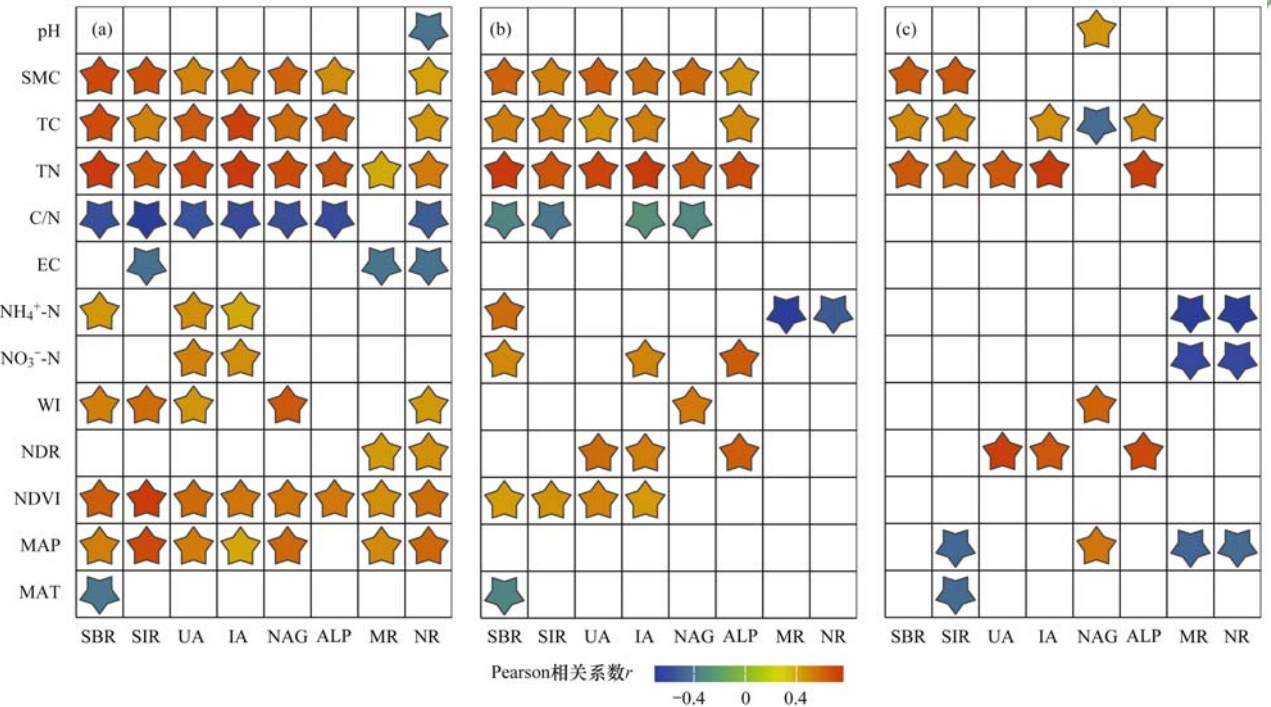
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在A层和B层与SBR、UA和IA正相关,而在B层和C层与MR和NR指标负相关,这表明深层土壤更弱的氮转化能力.大部分的气候植被因子(包括WI、NDVI和MAP)只在A层与土壤功能指标相关,而氮沉降速率NDR在3个土壤发生层都与土壤氮代谢相关的功能指标(包括UA、NAG、MR和NR)显著正相关.

表3 不同草地类型土壤发生层之间功能特征差异的多元置换方差分析

Table 3 PERMANOVA on differences in functional characteristics among soil genetic horizons in different grassland types		
组别	R^2	$P^{(1)}$
高寒草甸 vs. 高寒草原	0.039	0.075
A层 vs. A层	0.282	0.003
B层 vs. B层	0.171	0.048
C层 vs. C层	0.053	0.797
土壤发生层	0.26	0.003
高寒草甸	A层 vs. B层	0.442 0.001
	A层 vs. C层	0.473 0.001
	B层 vs. C层	0.073 0.376
高寒草原	A层 vs. B层	0.394 0.001
	A层 vs. C层	0.472 0.001
	B层 vs. C层	0.004 0.986

1) 黑体字表示两两比较的统计结果存在显著差异($P < 0.05$)

不同发生层环境因子和功能指标的RDA分析结果显示(图4),不同的土壤发生层驱动功能水平分异特征的环境因子不同. A层中TN、SMC、NDVI、C/N、MAP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、NDR、EC和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量解释了53.8%的功能变异,B层中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SMC、NDR、C/N和NDVI解释了61.7%



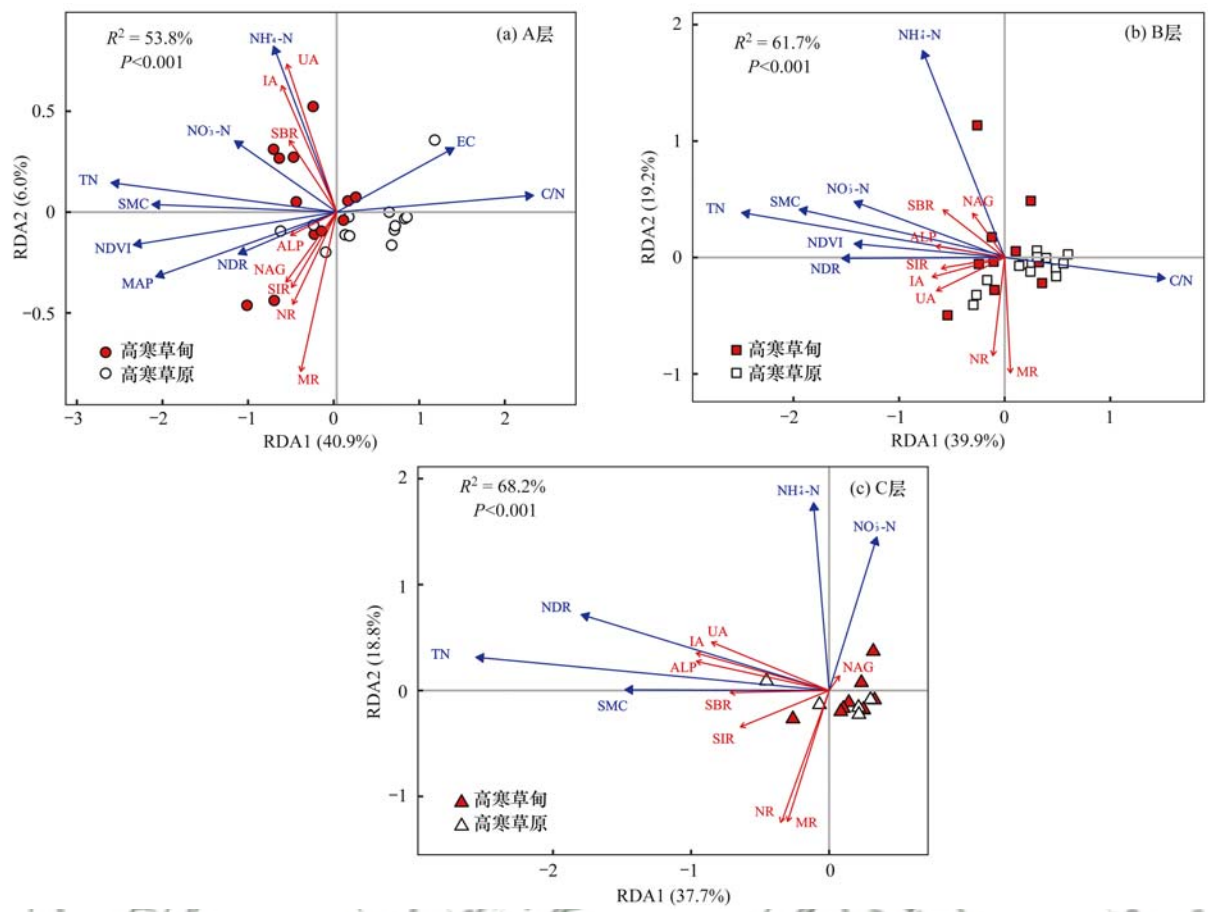
(a) A层,(b) B层,(c) C层;五角星表示环境因子与功能指标之间的相关关系显著($P < 0.05$),五角星正向表示正相关关系,反向表示负相关关系,五角星填充颜色的深浅表示相关系数 r 的大小

图3 土壤不同发生层功能指标和环境因子之间的 Pearson 相关分析

Fig. 3 Pearson correlation analysis between functional indicators and environmental factors in different soil genetic horizons

的功能特征变异,C层中TN、NDR、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SMC和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 解释了68.2%的功能特征变异.对RDA筛选出的环境因子进行层次分割以确定单个因子的解释率(图5),结果显示TN是3个发生层功能水平

分异的主要驱动因子,分别解释了18.3%、21.4%和27.5%的功能特征变异.同时,气候因子中的氮沉降速率NDR在3个发生层中分别解释了2.6%、3.6%和14.4%的功能特征变异.



红色箭头表示功能指标因变量,蓝色箭头表示环境因子自变量, R^2 表示模型的方差解释率, P 值表示统计检验的显著性

图 4 不同发生层功能指标和环境因子之间的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis between functional indicators and environmental factors in different genetic horizons

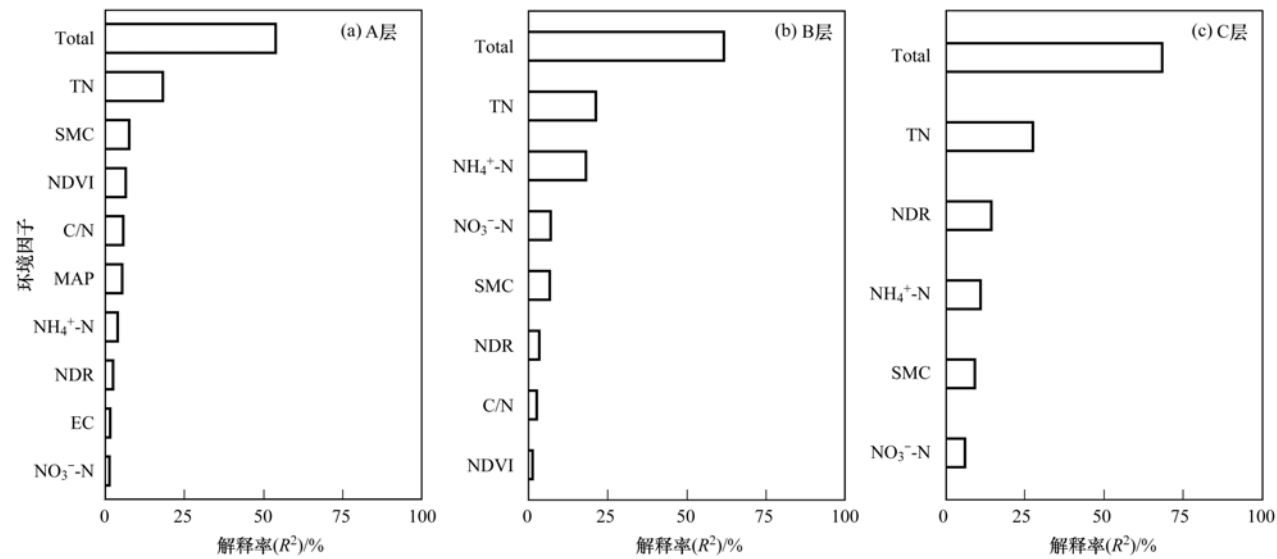
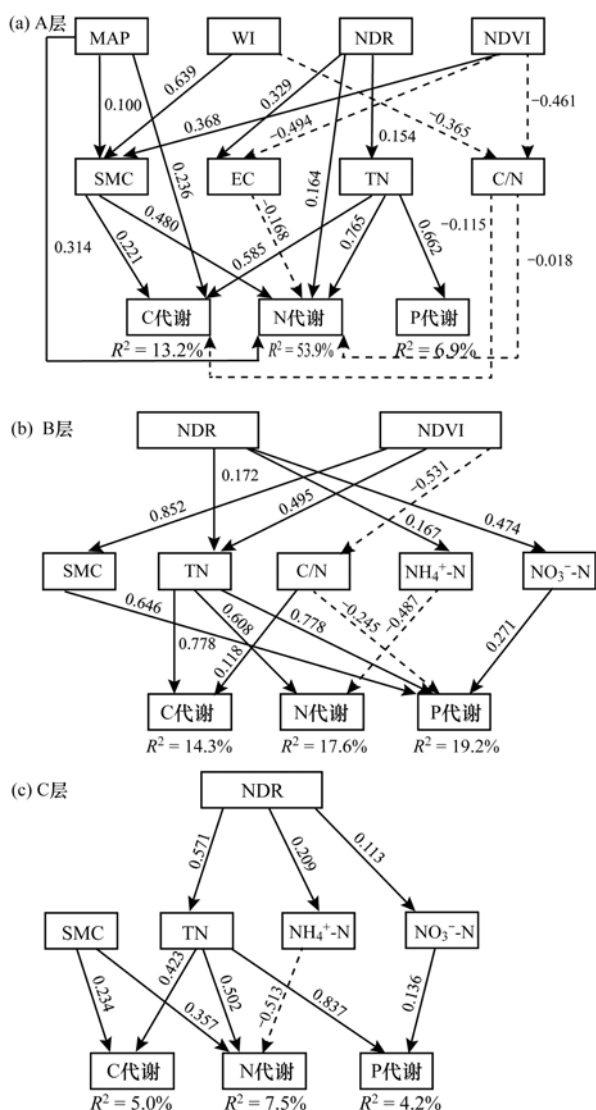


图 5 环境因子对于不同发生层功能指标变异的解释率 (R^2)

Fig. 5 Interpretation rate (R^2) of environmental factors for the variations in functional indicators in different genetic horizons

将土壤功能指标分为 C 代谢(包括 SBR、SIR、IA)、N 代谢(包括 UA、NAG、MR、NR)和 P 代谢(包括 ALP)这 3 类功能进行路径分析(图 6),结果表明,不同发生层的氮素特征(包括 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)和水分状况(SMC)是影响 C、N 和 P 代谢

的主要驱动因子. A 层中气候植被因子可直接影响或通过影响土壤理化性质间接影响土壤的 C、N 和 P 代谢,而在 B 层和 C 层中主要是通过影响土壤理化性质间接影响土壤的 C、N 和 P 代谢. 氮沉降速率 NDR 在 3 个发生层中均直接或通过输入外源性



实线箭头表示正向影响,虚线箭头表示负向影响,箭头旁数值为回归系数, R^2 表示相关因子对功能特征线性回归的解释率

图6 环境因子对不同发生层功能特征影响的路径分析

Fig. 6 Path analysis of the influence of environmental factors on the functional characteristics in different genetic horizons

氮改变土壤氮素特征间接影响 C、N 和 P 代谢。

3 讨论

3.1 土壤功能水平格局沿发生层的垂直变化

草地类型高寒草甸和高寒草地对于土壤功能的影响并不显著(表3),这一结果与汪子微等^[3]关于青藏高原5种高寒草地类型土壤酶活性的研究结果一致,这可能是与同一土壤发生层两种高寒草地类型的土壤理化性质比较接近相关,尤其是在B层和C层,两种草地类型的大部分土壤理化性质均没有显著差异(表2),因此本文重点讨论土壤剖面功能水平分异特征沿发生层的垂直变化。底层土壤结构、氧气、水分和养分可利用性相比于表层土有着较大的差异,底层土壤的功能特征以及对气候变化和环境扰动的响应与表层也会存在很大不同^[19]。三江源

地区高寒草地土壤的呼吸速率与以往针对中国东部农田土壤^[20]和青藏高原山地森林土壤^[21]的研究相比,基础呼吸和诱导呼吸的速率都更低,这与高寒草地较低的水分有效性和氮含量有关(表2),也代表了高寒草地相对较高的碳固存能力。青藏高原高寒草地生态系统是全球重要的碳储存库,尤其是在深层土中封存了大量未参与到全球碳循环中的有机碳^[22]。B层和C层的SIR与A层相差不大,表明深层土也有相当可观的碳矿化潜力。在全球变暖的背景下,关于高寒草甸土壤的模拟增温实验表明土壤温度的变化可能会影响土壤微生物的代谢活性并使得土壤呼吸速率增强,这对于青藏高原高寒草地这样一个重要的碳固存库的影响不容忽视^[23]。土壤的碳代谢酶和磷代谢酶活性比氮代谢酶活性更高,同时氮素的矿化速率和硝化速率与何芳等^[17]关于藏东南林地土壤矿化速率和硝化速率的研究相比,在3个土壤发生层中都相对较低,这显示了高寒草地土壤普遍较低的氮素有效性,氮素供应不足限制了微生物对于氮代谢酶的投入^[24]。但是过度放牧和降水增加带来的氮沉降问题可能会造成明显的外源氮素输入,对三江源地区土壤的功能特征可能造成很大的影响^[25]。土壤的所有功能指标从A层到C层逐渐降低,而且A层的相关功能指标通常是B层和C层的几倍到十几倍,这表明了表层土对于土壤整体生态系统功能和服务的相对重要性^[26],但是深层土也在土壤的生态系统服务中发挥着一定的作用,尤其是高寒草地土壤的深层封存着大量未参与到全球元素循环的物质^[27]。表层和底层差异性的功能特征有助于拓展对土壤生态系统功能的完整认识,而不是仅仅局限于土壤表层。

3.2 土壤性质驱动不同发生层功能水平格局的差异

已有的研究表明,土壤酶活性与土壤理化性质之间具有显著的相互作用,土壤理化性质可以通过改变土壤微生物的群落组成和代谢活动从而影响土壤酶的活性^[28],而土壤呼吸、矿化和硝化作用等养分循环过程又依赖于土壤酶促反应^[29,30]。在本研究中,3个土壤发生层中A层比B层和C层具有更高的SMC、TC、TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量以及更低的C/N,这些理化因子在不同发生层的差异都可能导致不同的酶活性和相关代谢速率在不同发生层间的差异^[31]。TN是3个土壤发生层中功能水平分异最主要的驱动因素(图5),与汪子微等^[3]发现藏区高寒草地土壤酶活重要的驱动因素是TN和有机质含量这一结果相一致,可能是由于TN是相关酶促反应底物的重要来源,同时TN代谢产生的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N可显著提高土壤氮素的有效性^[32]。Xu等^[33]

对中国东部森林生态系统土壤酶活的研究发现,土壤元素化学计量特征与土壤酶活性之间存在显著相关性,C/N 与大部分的功能指标呈现负相关关系,显著影响 C、N 和 P 循环的酶活性和相关的代谢活动,这说明 N 作为三江源地区高寒草地的重要限制元素,其循环过程以及和其他元素循环的耦合关系对土壤元素代谢的调节作用相当重要^[34]. 土壤的水分条件也是土壤功能特征的重要影响因素,水分可以溶出土壤的矿质离子并为生命活动提供必要的养分和反应条件,对于提高土壤养分的有效性和促进相关土壤代谢活动具有重要的意义^[35]. 土壤含水率对于 3 个土壤发生层功能水平分异特征的影响仅次于 TN,这与黄海莉等^[36]关于青藏高原高寒草甸土壤酶研究中的结果一致. 有研究表明土壤 pH 与土壤呼吸速率和相关酶活性的变化密切相关^[37,38],而本研究中 pH 对土壤酶活性并未产生显著影响,这可能是因为研究区域内高寒草地不同的土壤发生层之间 pH 较为接近.

3.3 气候和植被因子驱动不同发生层功能水平格局的差异

气候和植被因子通常被认为是大空间尺度上表层土壤功能变异的主要驱动因素,可通过直接影响(气温、降水和干旱等)或改变土壤的发育过程进而影响土壤理化性质间接影响土壤功能^[6]. 气候和植被因子在 A 层对土壤 C、N 和 P 代谢存在直接和间接影响,而在 B 层和 C 层以间接影响为主(图 6). MAT 对于不同土壤发生层功能特征的变异均没有显著影响,Jing 等^[9]的研究认为表层土壤胞外酶活性对西藏高山草原的短时模拟增温等环境变化不敏感,青藏高原的土壤可能更能抵抗温度突变,这与本研究的结果类似. NDVI 指数在 A 层和 B 层中主要通过增加氮素输入改变土壤的 C/N 进而影响土壤功能,这表明地表植被对于氮受限的三江源草地土壤功能的维持具有重要意义,过度放牧和气候变化带来的草地退化对于土壤功能的影响不容忽视^[39]. 降水和植被情况对于 C 层土壤功能特征的影响微乎其微,这与青藏高原整体性的极端气候和大面积的冻土区相关联,较低的平均气温和降水导致相关的气候因素很难通过土壤的物理屏障影响到深层土壤的微生物群落和功能多样性^[40]. 值得注意的是,大气氮沉降 NDR 对于 3 个发生层的土壤功能均存在显著影响,主要是通过增加土壤的外源氮素输入进而提高了土壤的氮素有效性,间接影响了土壤功能. 先前关于藏区林地和草原的研究表明,氮沉降对于土壤功能的影响存在不同的效应,对于氮素不受限的林地土壤,氮沉降抑制了土壤氮素的转化速率,

而对于氮受限的草原土壤,氮沉降反而有利于土壤的氮素转化^[41]. 同时氮沉降带来的土壤酸化问题也对土壤功能造成很大影响^[42,43]. 上述结果证明了土壤气候和植被条件对于土壤功能水平格局的影响是存在深度依赖性的,不同发生层土壤功能对于气候和植被因子的响应不同^[43]. 随着可预期的气候变化带来的青藏高原气温和降水量的改变,营养元素的淋溶作用和微生物的垂直迁移在发生层之间会越来越频繁,这会极大地改变土壤剖面不同发生层的功能格局^[44,45].

4 结论

(1) 三江源地区高寒草地类型对于土壤功能特征的影响不显著,而剖面土壤功能水平格局沿发生层存在显著差异,A 层比 B 层和 C 层具有更高的土壤呼吸、氮代谢速率和胞外酶活性.

(2) 三江源地区草地土壤呈现显著的氮受限特征,TN 是所有发生层中土壤功能水平格局主要的解释因子,其次是土壤的水分条件.

(3) 气候及植被因子主要是通过影响土壤的理化性质(营养和水分有效性)间接影响土壤的功能特征,大气氮沉降是影响土壤功能重要的气候因子.

致谢:衷心感谢中国科学院生态环境研究中心土壤环境科学与技术实验室和中国科学院南京土壤研究所的多位同仁在第二次青藏高原综合考察项目及土壤样本采集中给予的帮助和支持!

参考文献:

- [1] Hu W G, Ran J Z, Dong L W, *et al.* Aridity-driven shift in biodiversity-soil multifunctionality relationships [J]. *Nature Communications*, 2021, **12** (1), doi: 10. 1038/s41467-021-25641-0.
- [2] Chen L F, He Z B, Zhao W Z, *et al.* Empirical evidence for microbial regulation of soil respiration in alpine forests [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **126**, doi: 10. 1016/j. ecolind. 2021. 107710.
- [3] 汪子微, 万松泽, 蒋洪毛, 等. 青藏高原不同高寒草地类型土壤酶活性及其影响因子[J]. *植物生态学报*, 2021, **45** (5): 528-538.
Wang Z W, Wan S Z, Jiang H M, *et al.* Soil enzyme activities and their influencing factors among different alpine grasslands on the Qingzang Plateau [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45** (5): 528-538.
- [4] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. *生物多样性*, 2018, **26** (2): 111-129.
Zhang Z H, Zhou H K, Zhao X Q, *et al.* Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Biodiversity Science*, 2018, **26** (2): 111-129.
- [5] Stone M M, DeForest J L, Plante A F. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luquillo Critical Zone Observatory [J]. *Soil Biology and*

- Biochemistry, 2014, **75**: 237-247.
- [6] Dove N C, Barnes M E, Moreland K, *et al.* Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition[J]. ISME Communications, 2021, **1**(1), doi: 10.1038/s43705-021-00081-5.
- [7] Xu G, Liu Y, Long Z J, *et al.* Effects of exotic plantation forests on soil edaphon and organic matter fractions[J]. Science of the Total Environment, 2018, **626**: 59-68.
- [8] Jansson J K, Hofmockel K S. Soil microbiomes and climate change[J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, **18**(1): 35-46.
- [9] Jing X, Chen X, Xiao W, *et al.* Soil enzymatic responses to multiple environmental drivers in the Tibetan grasslands: Insights from two manipulative field experiments and a meta-analysis[J]. Pedobiologia, 2018, **71**: 50-58.
- [10] 李玉倩, 马俊伟, 高超, 等. 青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4959-4967.
- Li Y Q, Ma J W, Gao C, *et al.* Denitrification rates and *nirS*-type denitrifying bacteria community structure characteristics of bulk and rhizosphere soil in spring and summer in the alpine wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4959-4967.
- [11] Zhang X C, Jin X M. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China [J]. Ecological Indicators, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108223.
- [12] 周侃, 刘汉初, 樊杰, 等. 青藏高原国家公园群区域人类活动环境胁迫强度与空间效应——以三江源地区为例[J]. 生态学报, 2021, **41**(1): 268-279.
- Zhou K, Liu H C, Fan J, *et al.* Environmental stress intensity of human activities and its spatial effects in the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster: a case study in Sanjiangyuan region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(1): 268-279.
- [13] Peng X Q, Wang W. Stoichiometry of soil extracellular enzyme activity along a climatic transect in temperate grasslands of northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **98**: 74-84.
- [14] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮海拔变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(3): 441-449.
- Wang C T, Long R J, Cao G M, *et al.* Soil carbon and nitrogen contents along elevation gradients in the source region of Yangtze, yellow and lantsang rivers[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(3): 441-449.
- [15] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(1): 78-83.
- [16] Ge Y, Schimel J P, Holden P A. Evidence for negative effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(4): 1659-1664.
- [17] 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 等. 青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2449-2456.
- He F, Zhang L M, Shen C C, *et al.* Analysis of nitrogen transformation characteristics and influencing factors of forestland soil in the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of the Qilian Mountains and southeast Tibet [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2449-2456.
- [18] Bai X T, Wang J C, Dong H L, *et al.* Relative importance of soil properties and heavy metals/metalloids to modulate microbial community and activity at a smelting site[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, **21**(1): 1-12.
- [19] Qin S Q, Chen L Y, Fang K, *et al.* Temperature sensitivity of SOM decomposition governed by aggregate protection and microbial communities [J]. Science Advances, 2019, **5**(7), doi: 10.1126/sciadv.aau1218.
- [20] Wang J L, Li Q K, Shen C C, *et al.* Significant dose effects of fertilizers on soil diazotrophic diversity, community composition, and assembly processes in a long-term paddy field fertilization experiment [J]. Land Degradation & Development, 2021, **32**(1): 420-429.
- [21] Shen C C, Shi Y, Fan K K, *et al.* Soil pH dominates elevational diversity pattern for bacteria in high elevation alkaline soils on the Tibetan Plateau [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2019, **95**(2), doi: 10.1093/femsec/fiz003.
- [22] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 933-942.
- Tian Y Q, Ouyang H, Xu X L, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, **45**(5): 933-942.
- [23] Zhao Z H, Liu G H, Mou N X, *et al.* Assessment of carbon storage and its influencing factors in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Sustainability, 2018, **10**(6), doi: 10.3390/su10061864.
- [24] Jing X, Chen X, Tang M, *et al.* Nitrogen deposition has minor effect on soil extracellular enzyme activities in six Chinese forests [J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 806-815.
- [25] Sayer E J, Wagner M, Oliver A E, *et al.* Grassland management influences spatial patterns of soil microbial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **61**: 61-68.
- [26] Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome [J]. Nature Reviews Microbiology, 2017, **15**(10): 579-590.
- [27] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, *et al.* The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, **1**(10): 544-553.
- [28] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition[J]. Biogeochemistry, 2014, **117**(1): 23-37.
- [29] Weintraub S R, Wieder W R, Cleveland C C, *et al.* Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest [J]. Biogeochemistry, 2013, **114**(1): 313-326.
- [30] Heitkötter J, Niebuhr J, Heinze S, *et al.* Patterns of nitrogen and citric acid induced changes in C-turnover and enzyme activities are different in topsoil and subsoils of a sandy Cambisol [J]. Geoderma, 2017, **292**: 111-117.
- [31] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, *et al.* Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species[J]. Pedobiologia, 2014, **57**(2): 97-102.
- [32] Zhao S C, Li K J, Zhou W, *et al.* Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **216**: 82-88.
- [33] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **104**: 152-163.

- [34] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2021, **29**(12): 2769-2777.
Xiang X M, De K J, Qian W S, *et al.* Effects of nitrogen addition on plant community diversity and soil ecological chemometric characteristics in alpine meadows[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, **29**(12): 2769-2777.
- [35] Xiao W, Chen X, Jing X, *et al.* A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **123**: 21-32.
- [36] 黄海莉, 宗宁, 何念鹏, 等. 青藏高原高寒草甸不同海拔土壤酶化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(11): 3689-3696.
Huang H L, Zong N, He N P, *et al.* Characteristics of soil enzyme stoichiometry along an altitude gradient on Qinghai-Tibet Plateau alpine meadow, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(11): 3689-3696.
- [37] Li G L, Kim S, Han S H, *et al.* Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 212-221.
- [38] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 2109-2118.
Li J H, Yang G J, Wang S P, *et al.* Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 2109-2118.
- [39] Gui H W, Wagg C, Wang X T, *et al.* The loss of above- and belowground biodiversity in degraded grasslands drives the decline of ecosystem multifunctionality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **172**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104370.
- [40] Kang L Y, Chen L Y, Zhang D Y, *et al.* Stochastic processes regulate belowground community assembly in alpine grasslands on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Microbiology*, 2022, **24**(1): 179-194.
- [41] Fu G, Shen Z X. Response of alpine soils to nitrogen addition on the Tibetan Plateau: a meta-analysis[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **114**: 99-104.
- [42] Jiang L L, Wang S P, Pang Z, *et al.* Abiotic and biotic controls of soil dissolved organic nitrogen along a precipitation gradient on the Tibetan plateau[J]. *Plant and Soil*, 2021, **459**(1): 65-78.
- [43] Bai W, Wang G, Xi J, *et al.* Short-term responses of ecosystem respiration to warming and nitrogen addition in an alpine swamp meadow[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2019, **92**: 16-23.
- [44] 杨新宇, 林笠, 李颖, 等. 青藏高原高寒草甸土壤物理性质及碳组分对增温和降水改变的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, **53**(4): 765-774.
Yang X Y, Lin Y, Li Y, *et al.* Effects of warming and altered precipitation on soil physical properties and carbon pools in a Tibetan alpine grassland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, **53**(4): 765-774.
- [45] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, *et al.* Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, **4**(2): 210-220.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)