

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM_{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束前后两次污染过程特征分析 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag₃PO₄/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

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 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 刘畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

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

何芳^{1,2}, 张丽梅², 申聪聪², 陈金全³, 刘四义^{2*}

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650000; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650000)

摘要: 矿化和硝化过程是森林生态系统氮素循环的重要组成部分, 对生态系统功能的维持与土壤环境质量有着重要影响. 净矿化和净硝化速率是评价土壤氮素供应能力和氮损失风险的常用指标. 为探究青藏高原林地土壤氮转化特征及其影响因素, 以气候差异较大的祁连山和藏东南地区作为研究对象, 采集了 327 个林地土壤样本, 通过样本处理及室内培养试验, 分析了土壤中无机氮含量、净矿化速率、净硝化速率及其与环境因子之间的相关关系. 结果表明, 藏东南地区林地土壤的无机氮含量、净矿化速率和净硝化速率 [109.70 mg·kg⁻¹、3.08 mg·(kg·d)⁻¹ 和 2.19 mg·(kg·d)⁻¹] 均显著高于祁连山地区 [49.47 mg·kg⁻¹、0.70 mg·(kg·d)⁻¹ 和 0.69 mg·(kg·d)⁻¹]; 土壤的净矿化速率与年平均温度、年平均降水量、湿润指数及土壤有机质含量之间具有极显著的正相关关系 ($P < 0.001$). 净硝化速率与年平均温度、年平均降水量之间无显著正相关关系, 但与土壤净矿化速率呈极显著的正相关关系 ($P < 0.001$). 这表明藏东南地区林地土壤具有比祁连山林地土壤更高的氮素供应水平, 而水热条件可能是造成两地土壤净矿化速率差异的主要原因, 净矿化速率是净硝化速率的限制因子, 对青藏高原林地土壤的氮素损失有着重要影响. 这些结果强调了水热条件等气候环境因子对青藏高原林地土壤净矿化和净硝化速率的重要影响, 进一步加深了人们对青藏高原林地土壤氮素转化规律的认识.

关键词: 青藏高原; 矿化作用; 硝化作用; 无机氮; 氮损失

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2449-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010076

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

HE Fang^{1,2}, ZHANG Li-mei², SHEN Cong-cong², CHEN Jin-quan³, LIU Si-yi^{2*}

(1. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650000, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650000, China)

Abstract: Mineralization and nitrification, two important processes of the N cycle in forest ecosystems, play an important role in the maintenance of ecosystem function and soil environmental quality. The net mineralization rate and net nitrification rate are two common indexes for evaluation of the N supply and N loss risk in soil. In order to study the soil N transformation characteristics and their influencing factors in woodlands of the Qinghai-Tibet Plateau, the inorganic N concentrations, net N mineralization rates, and net nitrification rates of 327 soils sampled from the Qilian Mountains and Southeast Tibet were analyzed using indoor incubation experiments. The results showed that the inorganic N concentration, net N mineralization rate, and net nitrification rate of the woodland soil in Southeast Tibet [109.70 mg·kg⁻¹, 3.08 mg·(kg·d)⁻¹, and 2.19 mg·(kg·d)⁻¹] were significantly higher than those in the Qilian Mountains [49.47 mg·kg⁻¹, 0.70 mg·(kg·d)⁻¹, and 0.69 mg·(kg·d)⁻¹]. The net mineralization rate of soil was positively correlated with the mean annual temperature (MAT), mean annual precipitation (MAP), moisture index, and soil organic matter concentrations ($P < 0.001$). There were no significant positive relationships between the net nitrification rate and the MAT and MAP, but the net nitrification rate was positively correlated with the net N mineralization rate ($P < 0.001$). These results indicated that the N supply ability of woodland soil in Southeast Tibet is significantly higher than that in the Qilian Mountains, and the hydrothermal conditions (MAT and MAP) are likely responsible for the difference in the net mineralization rate between the two studied regions. The net mineralization rate is the limiting factor for the net nitrification rate, which has an important influence on the spatial distribution of the forest soil nitrification process in the Qinghai-Tibet Plateau. These results emphasize the important roles of climatic and environmental factors, such as hydrothermal conditions, on the net N mineralization and nitrification rates of woodland soil in the Qinghai-Tibet Plateau, and will further deepen the understanding of the law of soil N transformation in woodlands in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; mineralization; nitrification; inorganic nitrogen; nitrogen loss

收稿日期: 2020-10-13; 修订日期: 2020-11-06

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0306)

作者简介: 何芳(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氨氧化微生物, E-mail: hf2456404030@163.com

* 通信作者, E-mail: syliu@cees.ac.cn

青藏高原被誉为地球第三极^[1,2],是地球上面积最大和海拔最高的独特地域单元^[3],对维护国家的生态安全至关重要^[4]. 林地是青藏高原重要的一种土地类型,从高原东部到西部逐渐递减. 有研究表明高原东部边缘林地面积显著持续减少^[5]. 如何维持高原地区林地生态系统的健康、可持续发展是我国生态文明建设必须回答的一个重要问题. 氮作为植物生长的限制性营养元素之一^[6],其在土壤中的含量、形态及转化过程对林地植物的生长、温室气体排放以及水体质量有重要影响^[7]. 土壤氮循环过程包括生物固氮、矿化、同化、硝化和反硝化等多个重要过程^[8]. 其中氮的矿化和硝化过程是森林土壤有效氮供应与保持的两个关键过程^[9],也是评价土壤氮素供应能力和氮损失风险的常用指标^[7,10]. 针对土壤氮矿化和硝化过程的研究已有诸多报道^[11-14],但很多集中于模拟增温、增雨和氮沉降对土壤氮转化过程的影响^[14-16]. 而青藏高原面积辽阔,生境复杂^[3],尤其在高原暖湿化背景下,不同区域土壤氮循环特征及其驱动因子有待进一步明确,这对未来生态系统的管理、利用以及环境风险的评估等都具有重要意义.

祁连山位于青海省东北部和甘肃省西部边境,是青藏高原东北部边缘山脉,常年干旱少雨,年平均降雨量不足 600 mm,大部分地区平均气温在 0℃ 以下^[17],但 90 年代后期开始加速变暖^[18]. 祁连山上覆盖着诸多植被类型^[19],其中乔木和灌丛是重要的水源涵养林,也是维护地区生态平衡和经济发展的基础^[20]. 与之相反,位于西藏东南部和云南西北部

的藏东南高山峡谷区则降水较为丰沛,属亚高山温带半湿润气候,植被类型以森林和灌丛为主^[21]. 根据模型预测,2011~2050 年间西藏各地降水量普遍呈增加趋势,东南部湿润趋势明显,干旱化程度逐步减小. 这种暖湿化的趋势将有可能加速氮循环转化过程,增加土壤中氮素损失风险. 因此,本文以气候差异较大的祁连山和藏东南地区为例,研究了两个地区森林和灌丛土壤有效氮含量及氮转化特征与环境因子及土壤理化指标之间的关系,并在此基础上探讨未来暖湿化条件下土壤氮转化特征及其潜在的生态环境风险.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与土壤样本的采集

土壤样本取自祁连山东段和藏东南高山峡谷区域,祁连山地区研究区域范围为:北纬 37.07°~38.72°,东经 99.77°~103.83°,海拔范围 2 700~3 300 m,年平均气温 -3.7℃,年平均降雨量仅为 297 mm,为典型的高山高原气候. 祁连山地区主要乔木类型为青海云杉和圆柏,灌木类型为爬地柏、鲜黄小檗、杜鹃、金露梅和银露梅. 采样于 2019 年 7 月 20 日至 2019 年 8 月 7 日,沿祁连山东部向中西部进行,依次为景泰县、古浪县、天祝县、武威市、永昌县、民乐县和肃南裕固族自治县. 每个地点取 3 个海拔梯度(2 700、2 900 和 3 100 m)的森林样方(30 m × 30 m)以及灌丛样方(10 m × 10 m),每个样方取 3 份表层土壤(0~15 cm)样品,共 120 个(表 1).

表 1 两个地区土壤样本基本信息

Table 1 Background data of soil samples in two areas

采样区域	采样地	年平均温度 /℃	年平均降 水量/mm	湿润 指数	NDVI 指数 ¹⁾	氮沉降 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	土壤 pH	有机质 /%	全氮含量 /%	样方数 /个	土样数 /个
祁连山	景泰县	2.2	215	-34.9	0.53	13.23	7.07	7.29	0.37	4	12
	古浪县	-1.0	328	-8.6	0.88	16.67	7.00	12.53	0.63	6	18
	天祝县	0.2	337	-7.7	0.80	17.41	6.81	11.81	0.60	6	18
	永昌县	-3.8	300	-19.8	0.70	16.95	6.95	12.71	0.58	6	18
	民乐县	-9.8	335	-15.2	0.86	15.06	6.77	10.64	0.53	6	18
	武威市	-0.6	301	-17.4	0.80	17.33	6.79	15.48	0.70	4	12
	肃南裕固族	-7.6	253	-28.7	0.62	16.39	7.04	10.28	0.54	8	24
藏东南	芒康县	3.6	510	-5.6	0.67	13.25	5.53	7.70	0.42	10	30
	左贡县	5.0	695	24.2	0.67	11.52	6.25	10.78	0.50	19	57
	察隅县	6.7	814	39.2	0.70	10.71	5.72	22.94	0.96	9	27
	哈巴雪山	10.0	871	42.1	0.72	10.69	6.28	10.97	0.42	9	27
	白马雪山	6.4	688	32.2	0.67	9.90	5.41	29.00	0.68	9	27
	梅里雪山	9.5	662	40.3	0.68	11.32	6.15	14.84	0.51	13	39
合计										109	327

1) NDVI 指数表示植被归一化指数

藏东南高山峡谷位于西藏东南部和云南西北部之间,为青藏高原的温暖湿润区域,所选研究区域

(北纬 27.24°~29.94°,东经 97.92°~100.11°),海拔范围 1 707~4 338 m,年平均温度 6.3℃,年平均

降水量 697 mm. 藏东南高山峡谷地区主导乔木类型为松树、高山柏、冷杉和云杉, 主导灌木类型为帽斗栎、沙棘和密枝杜鹃. 采样于 2019 年 7 月 19 日至 2019 年 8 月 3 日, 沿东部向东南部进行, 依次为芒康县、左贡县、察隅县、德钦县和香格里拉县. 所选每座山体海拔间隔 100 m, 在每个森林和灌丛土壤样方(20 m × 20 m)取 3 份表层土壤样品, 共 207 个. 做好记录后冷链运回实验室过 2 mm 筛, 放 4℃ 冰箱冷藏用作后续分析.

1.2 样品分析及结果运算

1.2.1 土壤含水量、pH、土壤有机质及土壤全氮的测定

土壤含水率采用烘干法测定. 土壤 pH 以土水比 1:2.5 用 METTLER TOLEDO pH 计测定^[22]. 土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量采用重铬酸钾-分光光度法测定^[23], 土壤中有机碳(soil organic carbon, SOC)含量按公式(1)进行计算, 并换算成有机质含量. 土壤全氮(total nitrogen, TN)含量的测定参照中华人民共和国农业行业标准土壤检测部分: 土壤全氮的测定自动定氮仪法, 按公式(2)进行计算^[24].

$$\text{SOC} = \left[\frac{(A - A_0 - a) \times v/b \times m \times 1000}{m \times 1000} \right] \times 100 \quad (1)$$

式中, SOC 表示土壤样品中有机碳含量(%); A 表示样品吸光度; A_0 指空白样品吸光度; a 表示标准曲线的截距; b 表示标准曲线的斜率; v 为试样体积(mL); m 表示土壤样本称取量(g).

$$\text{TN} = (V - V_0) \times c \times 0.014 \times 100/m \quad (2)$$

式中, TN 表示土壤样品中全氮含量(%); V 表示滴定样品消耗标准酸体积(mL); V_0 表示滴定空白消耗标准酸体积(mL); c 为标准盐酸的浓度($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); 0.014 为氮的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mmol}^{-1}$); m 为风干土壤样本称取量(g).

1.2.2 无机氮含量及净矿化、净硝化速率的测定

称取上述土壤样品置于 250 mL 无菌锥形瓶中, 一式两份, 一份使用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl(国药, 优级纯)溶液浸提(土水比 1:5), 所得提取液用连续流动分析仪(AA3, SEAL analytical, 德国)测定初始 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度^[25, 26]. 另一份置于 25℃ 恒温培养箱中培养 7 d 后, 用同样方法测定溶液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度. 之后根据浸提液体积、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度和土壤含水率计算土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量^[27], 如公式(3). 培养后土壤中无机氮(NH_4^+ -N + NO_3^- -N)含量减去初始无机氮含量再除以培养时间即为净矿化速率^[28], 如公式(4)所示, NO_3^- -含量相

减再除以培养时间即为净硝化速率^[29], 如公式(5)所示.

$$W = \frac{c \times V}{[m/(1 + W_{\text{H}_2\text{O}})]/1000} \quad (3)$$

$$M_{\text{net}} = (\text{IN}_t - \text{IN}_0)/t \quad (4)$$

$$N_{\text{net}} = (\text{NI}_t - \text{NI}_0)/t \quad (5)$$

式中, W 表示土壤中铵态氮或硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c 为浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为浸提液体积; m 为土样质量(g); $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 为质量含水量; M_{net} 表示净矿化速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; IN 表示无机氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 为培养时间(d); N_{net} 表示净硝化速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; NI 表示硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.2.3 背景数据提取

背景数据根据采样地的经度和纬度, 使用 ArcGIS10.4.1 软件的提取分析功能进行提取, 气象背景数据和 NDVI 指数从中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=253>, <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257>) 提取, 大气氮沉降数据从国家生态科学数据中心 (<http://www.cnern.org.cn/data/meta?id=141884>) 提取.

1.2.4 数据分析

在置信水平为 95% 条件下用独立样本 t 检验来分析土壤 pH、无机氮、全氮含量、净矿化速率、净硝化速率以及环境因子(年平均温度、年平均降水量、湿润指数、氮沉降、NDVI 指数)在祁连山和藏东南地区之间的差异. 使用 Pearson 相关分析及多元线性回归分析研究净矿化速率和净硝化速率与土壤基本理化性质及环境因子之间的相关性. 所有数据统计均采用 SPSS 22.0 软件完成, 图表用 Origin 2018 和 Adobe Illustrator CC 2019 绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质与环境因子

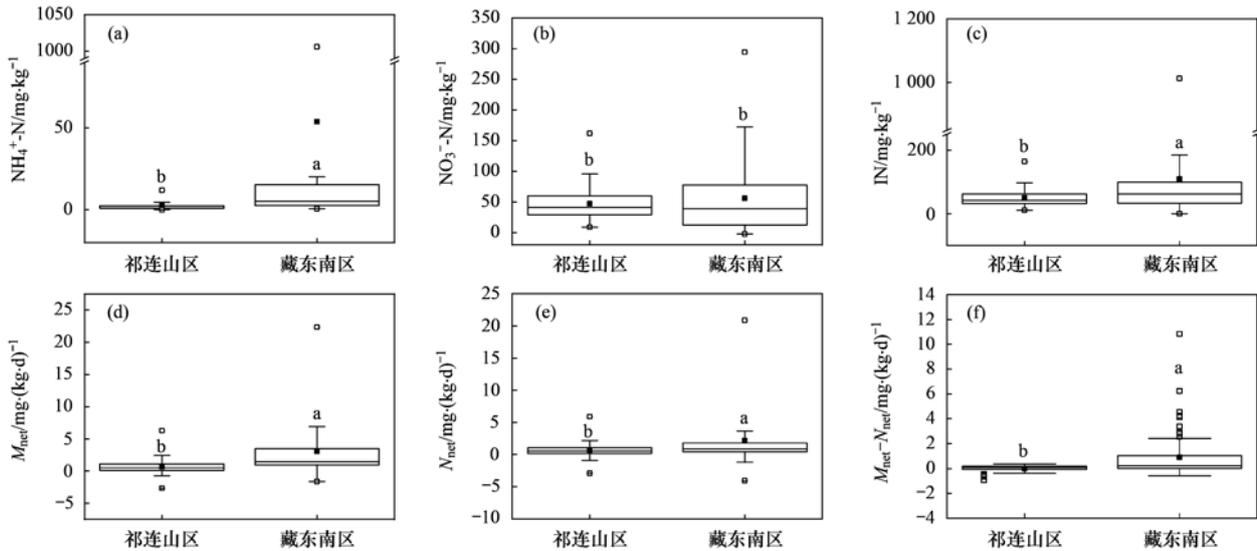
表 1 显示, 两地气候、土壤理化性质均存在显著性差异. 祁连山林地土壤具有比藏东南林地土壤显著更高的 pH ($P < 0.01$) 和显著更低的有机质含量 ($P < 0.01$). 而两地土壤的全氮含量则无显著差异 ($P > 0.05$). 祁连山地区年平均温度(MAT)、年平均降水量(MAP)和湿润指数(MI)均显著低于藏东南地区 ($P < 0.01$). 而祁连山地区的 NDVI 指数和年度总氮沉降量(TND)却显著高于藏东南地区 ($P < 0.05$).

2.2 土壤无机氮含量与氮转化速率

本研究结果显示(图 1), 祁连山和藏东南地区林地土壤的无机氮含量、形态组成以及氮转化特征

均有显著差异. 祁连山林地土壤 NH_4^+ -N和总无机氮含量分别为 $(2.46 \pm 0.46) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(49.47 \pm 4.28) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比藏东南林地土壤显著低95.4%和54.9% ($P < 0.05$); 而两地土壤的 NO_3^- -N含量则无显著差异. 祁连山林地土壤的 NO_3^- -N与 NH_4^+ -N含量的比值达19,无机氮的主导形态为 NO_3^- -N,而藏东南地区土壤的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量基本相当.

与无机氮组成不同的是,祁连山林地土壤的净矿化速率和净硝化速率均显著小于藏东南地区 ($P < 0.01$). 此外,祁连山和藏东南林地土壤净矿化速率与净硝化速率的差值也存在显著性差异 ($P < 0.01$). 其中祁连山区净硝化速率和净矿化速率基本接近,而藏东南地区净矿化速率高于净硝化速率 [净矿化 - 净硝化 = $0.84 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].



每个箱式图有5条水平线,从下到上分别表示最小值、数据集前半部分的中位数、整个列表的中位数、数据集后半部分中位数和最大值,白色方块表示异常值,黑色方块表示平均值,不同小写字母表示在95%的置信水平下两者之间具有显著性差异,IN表示无机氮含量, M_{net} 表示净矿化速率, N_{net} 表示净硝化速率,下同

图1 祁连山和藏东南地区林地土壤的无机氮含量及氮转化速率箱式图

Fig. 1 Box plot of the mineral nitrogen content and nitrogen transformation rate of forestland soil in the Qilian Mountain and Southeast Tibet

2.3 土壤氮转化速率与土壤理化指标及环境因子的相关关系

Pearson 相关分析结果表明(表2),土壤净矿化速率与pH呈显著负相关关系($P < 0.01$),与有机质含量呈正相关关系($P < 0.01$). 同时,土壤pH与MAT、MAP和MI呈显著负相关关系($P < 0.01$),与

NDVI和TND呈显著正相关关系($P < 0.01$). 多元回归结果显示(表3),MAT、MAP、MI、TND和NDVI能够共同解释pH变异的26.2% ($R = 0.521$, $P = 0.000$). 而MAT、MAP、MI、TND和土壤pH能够共同解释土壤有机质含量42.8%的变异量 ($R = 0.660$, $P = 0.000$).

表2 土壤无机氮含量及氮转化速率与土壤理化和环境因子之间的 Pearson 相关分析系数¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficients between the inorganic nitrogen content and nitrogen transformation rate and soil physicochemical and environmental factors

项目	MAT	MI	MAP	NDVI	TND	pH	SOM	TN	M_{net}	N_{net}
pH	-0.437**	-0.449**	-0.463**	0.185**	0.508**	1.000	-0.532**	-0.376**	-0.208**	-0.202**
有机质含量	0.140**	0.200**	0.094	0.051	-0.121**	-0.532**	1.000	0.886**	0.137**	0.209**
铵态氮含量	0.430**	0.481**	0.451**	0.007	-0.585**	-0.090	0.000	-0.051	0.271**	-0.031
硝态氮含量	0.099	0.125**	0.135**	0.232**	0.147	0.136**	-0.051	-0.035	0.291**	0.224**
无机氮含量	0.109*	0.247**	0.190**	0.052	-0.261**	-0.035	0.020	-0.063	0.202**	0.057
净矿化速率	0.355**	0.465**	0.372**	-0.003	-0.387**	-0.208**	0.137**	0.007	1.000	0.895**
净硝化速率	0.156	0.215*	0.160	-0.054	-0.189*	-0.202**	0.209**	0.072	0.895**	1.000

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, 黑体字表示二者之间具有显著性相关关系

净硝化速率与MAT、MAP无显著正相关关系,与TND呈显著负相关关系($P < 0.01$). 多元线性回归分析结果表明:MAT、MAP、MI和TND这4个因

子仅能解释净硝化速率15.9%的变异量. 而净硝化速率与pH呈现出了显著的负相关关系,与有机质含量和净矿化速率呈极显著正相关关系 ($P <$

表 3 土壤无机氮含量及氮转化速率与相关因子之间的多元回归分析结果

Table 3 Multiple regression analysis results of the inorganic nitrogen content, nitrogen transformation rate and related factors

因变量	解释变量	R	R ²	P
pH	MAT、MAP、MI、TND 和 NDVI	0.521	0.262	0.000
有机质含量	MAT、MAP、MI、TND 和 pH	0.660	0.428	0.000
净矿化速率	MAT、MAP、MI、TND、NDVI、pH 和 SOM	0.436	0.175	0.000
净硝化速率	MAT、MAP、MI、TND、NDVI、pH、SOM 和净矿化速率	0.904	0.814	0.000
净矿化-净硝化	MAT、MAP、MI、TND、NDVI、pH、SOM 和净矿化速率、 NH ₄ ⁺ -N、NO ₃ ⁻ -N、净矿化速率和净硝化速率	1.000	1.000	0.000

0.01), 且 MAT、MAP、MI、TND、NDVI、pH 和 SOM 能够共同解释净硝化速率 81.4% 的变异量 ($R = 0.904, P = 0.000$). 净矿化速率和净硝化速率的差值与土壤 pH 呈显著负相关关系, 与有机质含量呈正相关关系 ($P < 0.05$).

此外, NH₄⁺-N 含量与净矿化速率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 MAT、MAP、MI 呈正相关关系 ($P < 0.01$), 与总氮沉降呈负相关关系 ($P < 0.01$). NO₃⁻-N 含量与净矿化速率和净硝化速率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 NH₄⁺-N 含量呈负相关关系, 与植被 NDVI 指数呈正相关关系 ($P < 0.01$).

3 讨论

氮素是生态系统生产力的主要限制因子之一^[30]. 土壤中的氮素主要分为有机氮和无机氮两种形态, 而无机氮是植物吸收利用的主要氮素形态^[31]. 有机氮的矿化过程是土壤无机氮的主要来源^[32]. 本文研究显示藏东南林地土壤的净矿化速率和无机氮含量均显著高于祁连山区, 说明藏东南林地土壤具有比祁连山林地土壤更高的供氮潜力. 一般认为, 土壤氮的矿化速率与有机质和总氮含量呈显著的正相关关系^[6,30,33], 因为有机质的增加会提升土壤中氮循环相关功能基因丰度^[34]. 本文的结果也显示土壤的净矿化速率与有机质含量呈正相关关系, 但它与土壤 TN 和 C/N 之间相关关系不显著. 这意味着除了 SOM 和 TN 含量以外的其他环境因素可能也对土壤氮的矿化过程产生了重要影响. 进一步分析发现净矿化速率与当地 MAT、MI 和 MAP 呈显著的正相关关系 (图 2), 且这些环境因子与土壤有机质含量、pH 等理化性质有显著的相关关系. 这说明在氮循环中温度和降水等气候条件会通过影响土壤的理化性质, 从而显著地影响祁连山和藏东南地区林地土壤的氮矿化过程. 有研究表明增温增雨能显著提高微生物的酶活性, 促进凋落物的降解, 增加土壤养分^[35], 从而为土壤矿化过程提供更多的基质^[15]. Rustad 等^[36]选取了全球 32 个生态系统, 就净矿化速率对模拟增温增雨的反应进行的 meta 分

析也发现土壤的净氮矿化速率随年平均温度和年平均降水量的升高呈上升趋势.

与土壤矿化速率和无机氮含量的结果相反, 祁连山地区植被的 NDVI 指数却显著高于藏东南地区. 相关分析的结果也显示, 土壤的净矿化速率、无机氮含量与植被的 NDVI 指数没有显著的相关关系. 本文的结果显示祁连山区和藏东南林地土壤的无机氮含量在 49 ~ 109 mg·kg⁻¹, 与我国东部地区一些氮饱和森林土壤的无机氮含量较为接近^[25], 说明相应研究区域土壤氮素的供应均较为充足, 对地上植物生长限制相对较小. 因此, 土壤矿化速率、无机氮含量与植被 NDVI 指数之间没有显著的相关关系. 而净矿化速率与氮沉降显示出显著的负相关关系 [图 2(c)]. 有研究表明, 只有在受氮限制的森林土壤中, 氮素净矿化速度才随氮沉降增加而增加, 而在氮丰富的森林土壤中, 增加氮输入矿化速率反而下降^[6,13]. 因此, 祁连山地区的氮沉降量可能对研究区域林地土壤氮矿化过程产生了抑制作用, 未来研究还需进一步关注.

硝化过程是决定土壤中无机氮形态组成的重要因素, 硝化能力越强硝态氮占无机氮的比例就越高^[37]. 与湿润地区相比, 干旱地区土壤 pH 相对较高, 硝化能力也相对较强^[7], 因而土壤中硝态氮占无机氮含量的比例也相对更高. 与前人研究结果类似, 本文也发现降水相对较少的祁连山区土壤 pH 相对较高 (7.02 ± 0.02), 硝态氮占无机氮含量的比例达到 90% 以上, 而降水相对较多的藏东南地区有相对较低的土壤 pH (5.93 ± 0.05), 硝态氮占无机氮含量的比例仅为 50%, 甚至更低. 这进一步证明了气候条件 (温度和降水) 所决定的土壤性质 (pH 和有机质含量) 对无机氮形态的组成具有重要影响 (如图 3). 此外, 本文还发现土壤的净硝化速率与净矿化速率呈极显著的正相关关系, 见图 2(i), 并能解释净硝化速率 80% 以上的变异, 这说明净矿化速率才是限制硝化速率的主导因子. 有很多研究也表明土壤硝化和氮矿化之间存在显著的正相关关系^[15,38], 认为净矿化速率是硝化速率最重要的驱动因素. 因为净矿化速率的增加将为自养硝化作用提

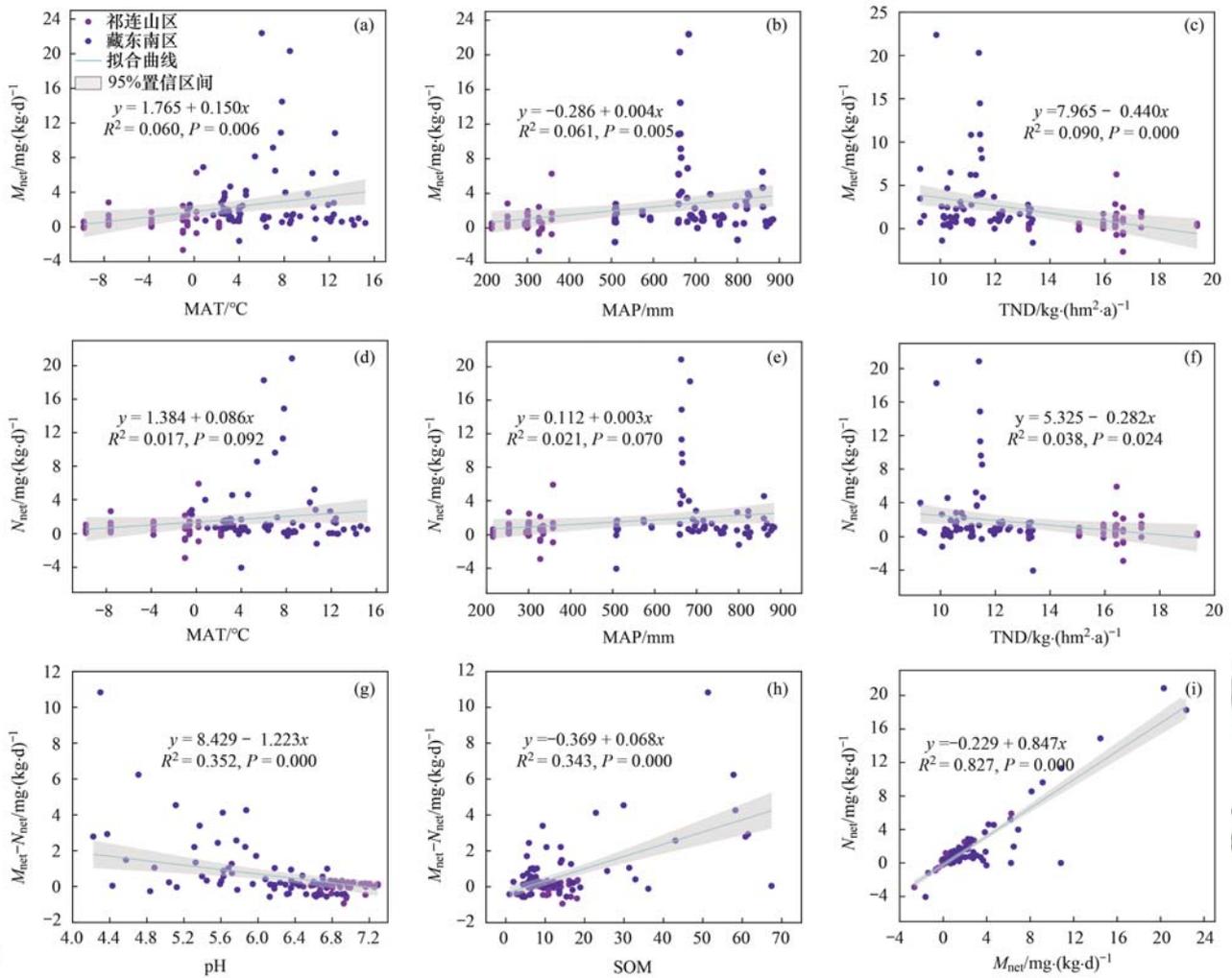


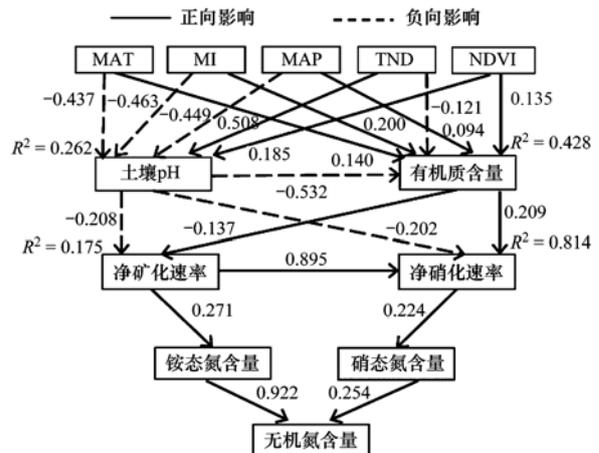
图 2 土壤理化性质、环境因子与净矿化、净硝化速率之间的线性回归

Fig. 2 Linear regression between the soil physicochemical and environmental factors and net mineralization and nitrification rates

供更多的底物^[39]。因祁连山区土壤的净矿化速率显著小于藏东南地区,从而限制了祁连山林地土壤的硝化速率,再加上氮沉降的抑制作用,使得祁连山林地土壤的净硝化速率显著小于藏东南地区。

需要指出的是,尽管祁连山林地土壤的净硝化速率显著小于藏东南林地土壤的净硝化速率,并不等同于祁连山林地土壤的硝化能力比藏东南林地土壤小。本文研究结果显示,祁连山林地土壤的净硝化速率与净矿化速率大致相当(净矿化 - 净硝化 = 0),说明矿化作用所产生的铵态氮能够快速被硝化过程所消耗;而藏东南林地土壤的净矿化速率则明显大于净硝化速率[净矿化 - 净硝化 = 0.84 mg·(kg·d)⁻¹],说明矿化作用产生的铵态氮并不能完全被硝化过程所消耗,导致了藏东南地区土壤铵态氮含量的累积。由于青藏高原的林地生态系统一般不会进行氮肥的施用管理,所以在未来研究中需要重视土壤硝化能力与实际的净硝化速率不一致对青藏高原林地土壤氮循环的影响。

土壤硝态氮主要来源于土壤的硝化过程^[40]。理



箭头旁数值为相关系数, R² 表示相关因子的线性回归解释变量

图 3 环境因子对土壤氮转化影响的路径分析

Fig. 3 Path analysis of the influence of environmental factors on soil nitrogen transformation

论上藏东南地区 NO₃⁻-N 含量本应高于祁连山地区,但两地土壤之间的 NO₃⁻-N 含量却无显著性差异。这很可能与藏东南地区的温度和降水显著高于祁连山

地区有关, 因为温暖湿润的气候有利于硝态氮淋失和反硝化作用的进行^[16,41], 造成了藏东南地区 NO_3^- -N 的损失, 祁连山区 NO_3^- -N 含量的累积. 两个地区氮循环相关微生物的群落组成及功能活性的差异也可能是导致这一差异的主要原因, 有待进一步探讨.

4 结论

(1) 藏东南和祁连山两地气候差异显著, 土壤中氮的含量及转化速率也存在显著性差异.

(2) 藏东南地区林地土壤的无机氮含量、净矿化速率和净硝化速率均显著高于祁连山区, 因而具有更高的氮素供应潜力和氮素损失风险.

(3) 气候及环境因子主要是通过影响土壤的理化性质 (pH 和有机质) 进而影响土壤中氮的净矿化和净硝化速率, 最终决定了无机氮的含量和形态.

致谢: 衷心感谢云南大学生态与环境学院、兰州大学资源环境学院和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的多位同仁在藏东南与祁连山地区联合科考及土壤样本采集中给与的帮助和支持!

参考文献:

- [1] Kou D, Ding J Z, Li F, *et al.* Spatially-explicit estimate of soil nitrogen stock and its implication for land model across Tibetan alpine permafrost region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1795-1804.
- [2] 姚檀栋. 刘东生先生和青藏高原研究[A]. 见: 纪念刘东生院士[C]. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2009. 107-110.
- [3] Hua T, Wang X M. Temporal and spatial variations in the climate controls of vegetation dynamics on the Tibetan Plateau during 1982- 2011 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(11): 1337-1346.
- [4] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, **67**(1): 3-12.
Sun H L, Zheng D, Yao T D, *et al.* Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(1): 3-12.
- [5] Cui X F, Graf H F. Recent land cover changes on the Tibetan Plateau: a review[J]. *Climatic Change*, 2009, **94**(1-2): 47-61.
- [6] Cheng Y, Wang J, Wang J Y, *et al.* Nitrogen deposition differentially affects soil gross nitrogen transformations in organic and mineral horizons[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **201**, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.103033.
- [7] Zhang J, Cai Z, Müller C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**(3): 488-501.
- [8] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. *微生物学通报*, 2013, **40**(1): 98-108.
He J Z, Zhang L M. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation[J]. *Microbiology China*, 2013, **40**(1): 98-108.
- [9] Wang J, Zhang J B, Müller C, *et al.* Temperature sensitivity of gross N transformation rates in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(2): 423-431.
- [10] Liu S Y, Zhang X P, Zhao J, *et al.* Effects of long-term no tillage treatment on gross soil N transformations in black soil in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2017, **301**: 42-46.
- [11] Xu Z F, Hu R, Xiong P, *et al.* Initial soil responses to experimental warming in two contrasting forest ecosystems, Eastern Tibetan Plateau, China: Nutrient availabilities, microbial properties and enzyme activities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, **46**(2): 291-299.
- [12] Zhang X Z, Shen Z X, Fu G. A meta-analysis of the effects of experimental warming on soil carbon and nitrogen dynamics on the Tibetan Plateau[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **87**: 32-38.
- [13] Xiong Q L, Pan K W, Zhang L, *et al.* Warming and nitrogen deposition are interactive in shaping surface soil microbial communities near the alpine timberline zone on the eastern Qinghai-Tibet Plateau, southwestern China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **101**: 72-83.
- [14] Dai Z M, Yu M J, Chen H H, *et al.* Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(9): 5267-5276.
- [15] Zaman M, Chang S X. Substrate type, temperature, and moisture content affect gross and net N mineralization and nitrification rates in agroforestry systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, **39**(4): 269-279.
- [16] Zhang X Y, Li Q W, Gao J Q, *et al.* Effects of rainfall amount and frequency on soil nitrogen mineralization in Zoigê alpine wetland[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, **97**, doi: 10.1016/j.ejsobi.2020.103170.
- [17] Yang Y F, Gao Y, Wang S P, *et al.* The microbial gene diversity along an elevation gradient of the Tibetan grassland[J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(2): 430-440.
- [18] 吕越敏, 李宗省, 冯起, 等. 近 60 年来祁连山极端气温变化研究[J]. *高原气象*, 2019, **38**(5): 959-970.
Lv Y M, Li Z S, Feng Q, *et al.* Analysis of extreme temperature changes in Qilian Mountains in the past 60 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(5): 959-970.
- [19] Wan Q Z, Zhu G F, Guo H W, *et al.* Influence of vegetation coverage and climate environment on soil organic carbon in the Qilian Mountains[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-53837-4.
- [20] 戎战磊. 气候变化对祁连山优势物种分布和植被格局的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. 91-116.
Rong Z L. Effects of climate change on distribution of dominant species and pattern of vegetation in Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. 91-116.
- [21] Chen H, Zhu Q, Peng C H, *et al.* The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(10): 2940-2955.
- [22] 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 等. 模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5665-5671.
Li Z M, Shen J P, Zhang L M, *et al.* Effects of Stimulated Nitrogen deposition on the bacterial community structure of semiarid temperate grassland[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5665-5671.

- [23] Zhao Z B, He J Z, Quan Z, *et al.* Fertilization changes soil microbiome functioning, especially phagotrophic protists[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107863.
- [24] NY/T 1121-2012, 中华人民共和国农业行业标准[S].
- [25] Zhang J B, Cai Z C, Zhu T B, *et al.* Mechanisms for the retention of inorganic N in acidic forest soils of southern China [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep02342.
- [26] He Z Y, Shen J P, Zhang L M, *et al.* DNA stable isotope probing revealed no incorporation of $^{13}\text{C}\text{O}_2$ into comammox *Nitrospira* but ammonia-oxidizing archaea in a subtropical acid soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(3): 1297-1308.
- [27] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2001, **55**(1): 485-529.
- [28] Rui Y C, Wang S P, Xu Z H, *et al.* Warming and grazing affect soil labile carbon and nitrogen pools differently in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 903-914.
- [29] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(5): 521-530.
- [30] Wang C H, Wang N N, Zhu J X, *et al.* Soil gross N ammonification and nitrification from tropical to temperate forests in eastern China[J]. *Functional Ecology*, 2018, **32**(1): 83-94.
- [31] Liu S Y, Chi Q D, Cheng Y, *et al.* Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and reducing N loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1265-1273.
- [32] Li Z L, Tian D S, Wang B X, *et al.* Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(3): 1078-1088.
- [33] Kou D, Peng Y F, Wang G Q, *et al.* Diverse responses of belowground internal nitrogen cycling to increasing aridity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 189-192.
- [34] 储成, 吴赵越, 黄欠如, 等. 有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2468-2475.
- Chu C, Wu Z Y, Huang Q R, *et al.* Effect of organic matter promotion on nitrogen-cycling genes and functional microorganisms in acidic red soils[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2468-2475.
- [35] 张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 等. 模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3363-3472.
- Zhang C J, Shen J P, Sun Y F, *et al.* Responses of soil ammonia oxidizers to simulated warming and increased precipitation in a temperate steppe of inner mongolia [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3363-3472.
- [36] Rustad L, Campbell J, Marion G, *et al.* A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming [J]. *Oecologia*, 2001, **126**(4): 543-562.
- [37] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, *et al.* Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2020, **13**(3): 221-226.
- [38] Booth M S, Stark J M, Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data [J]. *Ecological Monographs*, 2005, **75**(2): 139-157.
- [39] Bai E, Li S L, Xu W H, *et al.* A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics [J]. *New Phytologist*, 2013, **199**(2): 441-451.
- [40] 林俊杰, 张帅, 刘丹, 等. 季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 697-702.
- Lin J J, Zhang S, Liu D, *et al.* Effect of seasonal temperature increasing on nitrogen mineralization in soil of the water level fluctuating zone of three gorge tributary during the dry period[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 697-702.
- [41] Fan Z P, Tu Z H, Li F Y, *et al.* Experimental manipulation of precipitation affects soil nitrogen availability in semiarid mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) Plantation[J]. *Water*, 2017, **9**(3), doi: 10.3390/w9030208.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
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	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)