

降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响 研究进展

闫钟清^{1,2} 齐玉春¹ 李素俭³ 董云社^{1*} 彭琴¹ 贺云龙^{1,2} 李兆林^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101)

(2. 中国科学院大学 北京 100049)

(3. 西北农林科技大学生命科学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 降雨格局改变和区域氮沉降增加是近年来全球变化研究中的热点问题,而草地生态系统分布十分广泛,且大多位于生态脆弱带,易受到全球变化的干扰而失衡。土壤微生物及土壤酶活性是自然生态系统中土壤质量变化的敏感性指标,微生物与酶活性的变化可用来监测水、氮变化大背景下草地生态系统结构和功能的改变。基于此,综述了降雨格局改变和氮沉降增加及其双因子交互作用对草地土壤系统中微生物数量、微生物生物量、微生物多样性与酶活性变化影响的相关研究进展,为更好地预测评估并最终调控和保持草地生态系统稳定性提供科学依据,同时分析阐述了当前工作中存在的一些问题与不足,并对未来研究所面临的关键科学问题进行了探讨和展望。

关键词: 草地生态系统, 土壤微生物, 酶活性, 降水, 氮沉降

Soil microorganisms and enzyme activity of grassland ecosystem affected by changes in precipitation pattern and increase in nitrogen deposition—a review

YAN Zhong-Qing^{1,2} QI Yu-Chun¹ LI Su-Jian³ DONG Yun-She^{1*} PENG Qin¹
HE Yun-Long^{1,2} LI Zhao-Lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Changes in precipitation pattern and increase in regional nitrogen deposition have turned to

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41330528, 41573131, 41373084, 41203054); The Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201203012-6)

*Corresponding author: Tel: 86-10-64889320; E-mail: dongys@igsnr.ac.cn

Received: September 29, 2016; **Accepted:** March 06, 2017; **Published online** (www.cnki.net): March 06, 2017

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41330528, 41573131, 41373084, 41203054); 公益性行业(科研专项)项目(No. 201203012-6)

*通讯作者: Tel: 86-10-64889320; E-mail: dongys@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2016-09-29; 接受日期: 2017-03-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-03-06

be two hot issues in the study on global change in recent years. As grassland ecosystems are widely distributed over the globe and mostly in the ecological fragile zones, they are very sensitive and susceptible to the interference of global change and then lose balance. Soil microorganisms and soil enzyme activity are sensitive indicators of soil quality in natural ecosystems, They can be used to monitor changes of grassland ecosystems in structure and function under the grand background of changes in water and nitrogen. Based on this, a review is presented of progresses of the study on impacts of changes in precipitation pattern and increase in nitrogen deposition, and their interaction on number, biomass and diversity of soil microbes and enzyme activity, so as to provide a scientific basis for better prediction, evaluation and eventual control and maintenance of the stability of grassland ecosystems. At the same time, problems and shortcomings existing in the current work are analyzed and key scientific issues in future research are also discussed and previewed.

Keywords: Grassland ecosystem, Soil microorganisms, Enzyme activity, Precipitation, Nitrogen deposition

气候变化主要包括全球变暖、降水格局的改变、氮沉降增加和大气 CO₂ 浓度升高等^[1], 降水格局改变和氮沉降增加是全球变化的两项重要内容。水是维持生态系统的重要因子, 其变化往往会引起生态系统结构和功能的改变, 并由此成为生态系统演变的驱动力。由于矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产和施用、人口增长和畜牧业发展等原因, 人类向大气中排放的含氮化合物越来越多, 大气氮沉降增加已成为一个日趋严重的全球变化现象^[2]。由此导致生态系统中氮输入量增加, 影响土壤微生物分解、土壤呼吸、养分的矿化与固定等一系列生态过程变化, 引起土壤微环境和土壤养分有效性的改变^[3]。

草地生态系统作为陆地生态系统的主体类型, 约占陆地总面积的 1/4-1/3^[4]。我国现有不同类型草地, 面积约 4 亿 hm², 占国土总面积的 40% 以上, 是我国陆地面积最大的生态系统类型^[5]。

降水格局的改变和大气氮沉降持续增加将会严重影响生态系统的结构与功能, 特别是在受水、氮资源限制的干旱-半干旱草地生态系统。土壤微生物是土壤养分循环和转化的催化剂, 促进植物对养分的吸收, 是植物养分的重要来源^[6]。土壤酶作为土壤生态系统的组分之一, 是生态系统的生物催化剂, 在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用, 它们参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环, 既是土壤有机物转化的执行者, 又是植物营养元素的活性库, 土壤微生物及植物根系等能够释放各种酶类进入土壤(图 1), 土壤微生物和酶一起推动着土壤的代谢过程^[7]。因此, 研究未来降水格局变化与氮沉降增加对草地生态系统土壤微生物和酶活性的变化, 对于更好地预测土壤中物质和能量的转移转化与土壤质量的保持具有重要意义, 从而可持续地利用草地生态系统的各项服务功能。

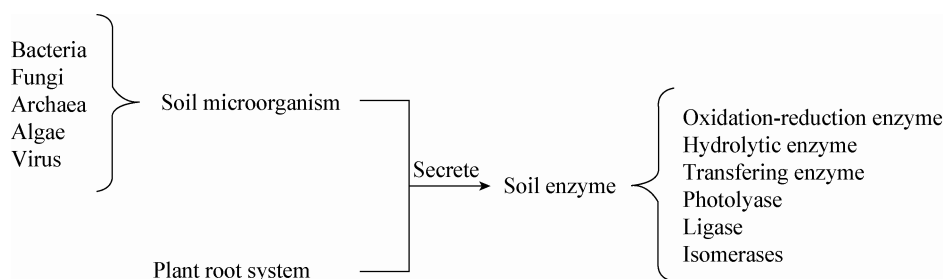


图 1 土壤微生物与酶的关系

Figure 1 Relationship between soil microbes and enzymes

Tel: 010-64807511; E-mail: tongbao@im.ac.cn; <http://journals.im.ac.cn/wwxtbcn>

1 草地土壤微生物数量、微生物量变化

土壤微生物数量一般分细菌、真菌两大类群或者某些种群的微生物数量进行测定^[8]。广义的土壤微生物量包括土壤微生物量碳、土壤微生物量氮、土壤微生物量磷和土壤微生物量硫^[9]。一般研究较多的主要是微生物量碳、氮,它们被认为是土壤活性养分的储存库,也是植物生长可利用养分的重要来源之一^[10]。

1.1 降水增加对草地土壤微生物数量、微生物量的影响

大气降水对土壤微生物数量的影响存在短时效应和长时效应。降雨后短时间内土壤中水分增多,促进了可溶性有机碳的分解,使微生物呼吸量迅速增大,为短时效应;随着土壤微生物数量激增,导致土壤中 CO₂ 排放量显著增加,即长时效应^[11],通过测定微生物的基础呼吸速率,发现土壤含水量的空间差异会影响土壤微生物的总生物量^[12]。在中国科尔沁沙质草甸,土壤微生物总数、细菌数量均表现出与降雨量同步的季节动态,真菌数量从 5 月份到 8 月份呈递增趋势,随后减少至最低^[13]。在东北羊草草原也发现了相同的变化规律,即微生物数量与降雨季节变化基本保持一致,土壤细菌和真菌的最大值都出现在 8 月^[14]。也有研究表明,降水对不同的微生物类群数量会产生不同的影响。Bapiri 等^[15]研究表明,干湿交替循环对土壤真菌没有显著影响,而显著降低细菌生物量,导致细菌/真菌比值降低。

土壤微生物对土壤水分含量的变化能够迅速做出反应,在加州干旱-半干旱草地上的研究表明,土壤含水量急剧增加会显著降低微生物生物量碳^[16-17]。在美国中部科罗拉多洲半干旱矮草草原进行野外试验,对试验小区遮雨 21 d 后分别增加 0、1 和 2 cm 降水量,降水添加第 3 天时土壤微生物大量生长繁殖,相比于对照土壤微生物生物量氮分别增加了 71%和 170%;随土壤水分含量降低,在第 10 天时不同处理之间的差别几乎消失^[18]。

1.2 氮沉降增加对草地土壤微生物数量、微生物量的影响

氮沉降增加对于不同种类土壤微生物数量的

影响也不同,有研究表明施 N 肥有利于草地土壤细菌数量的增加,但对真菌数量的影响很小或是降低真菌的数量^[19]。Bardgett 等认为在草地生态系统中,施氮对微生物群落的影响与高氮下真菌含量的减少有关^[20]。在加利福尼亚南部灌木草原的研究表明,大气氮沉降不利于丛枝菌根的生长^[21]。不同气候会影响氮肥的作用效果,在气候湿润且温度适宜的地区,施氮肥可以显著提高土壤中三大微生物种群的数量和土壤微生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤微生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN),在施肥 15 d 后增加最快,氮素随着时间变化逐渐消耗殆尽,土壤中 SMBC 和 SMBN 增加变缓;在气候干燥且温度炎热的地区,SMBC 和 SMBN 增加不明显^[22]。施氮持续的时间长短不同也会产生不同的效应,短期施 N 对草地土壤微生物生物量的影响有增加^[23]、降低^[24-25]和不产生影响^[26]等 3 种情况,而长期施 N 会降低土壤微生物生物量^[27]。氮肥的施用量以及类型不同也会对微生物产生不同的影响。Zhang 等^[28]研究施 N 对中国内蒙古温带草原土壤的影响发现,土壤微生物量在施 N 水平为 16 g N/(m²·yr)时最高,高 N 水平[32 g N/(m²·yr)、64 g N/(m²·yr)]反而降低了草地土壤微生物量,并推测出对中国北方草地土壤微生物量而言,最佳的 N 浓度为 16-32 g N/(m²·yr)。张彦东等^[29]研究施 N 对金沙江干热河谷退化草地的影响发现,土壤微生物量在施 N 量为 5、15 g N/(m²·yr)时没有明显变化,而当施 N 量增至 25 g N/(m²·yr)时,土壤微生物量明显增加,原因在于该退化草地严重缺 N,高 N 处理使地上生产力、土壤有机质和有效 N 增加,缓和了植物和微生物之间的竞争,促进微生物量的增加,同样在中国黄土高原的盐碱草地,由于该地区常年受氮素限制,施氮后显著地提高了微生物量^[30],而对于高营养水平的草地,氮素不是影响微生物群落生长的限制因子,施氮将很难引起微生物量的改变。除此之外,不同的氮素类型对微生物量的影响也存在差异, Lovell 等^[31]

利用室内土壤培养研究施肥对英国北威克一个永久性黑麦草草地的影响发现,施有机肥(牛粪)能增加土壤微生物量,但施无机 N 肥(NH_4NO_3)对微生物量没有显著影响^[32]。在荷兰的一片草地上,增氮实验使真菌的量减少,但是对细菌没有显著性影响^[33]。

1.3 水、氮交互作用对草地土壤微生物数量、微生物生物量的影响

陈美玲^[34]在贝加尔针茅草原进行水、氮添加及其交互作用的野外控制试验,降水处理设置 3 个梯度(自然降水;增加自然降水 1/7;增加自然降水 2/7),增氮处理设置 3 个梯度[对照;施加 5 g N/($\text{m}^2\cdot\text{yr}$);施加 10 g N/($\text{m}^2\cdot\text{yr}$)]。在相同的增氮水平上,随着增雨梯度的增加,微生物的总 PLFA 含量出现一直下降的趋势,在增氮处理下,两种梯度下降比例为 19.15%和 8.93%,增雨处理使总量下降了 32.41%和 17.74%。增氮增雨的处理对于细菌总量的影响是:增氮使细菌呈现负增加效应,分别减少了 13.43%和 13.12%。增雨实验同样使得细菌先下降后增加的趋势,比例为 14.12%和 27.63%。对于真菌群落,两种处理分别使其总量出现先下降后增加的趋势,氮处理下降比例为 1.90%和增加比例为 27.87%,增雨处理下为 9.57%和 49.84%。对于丛枝菌根真菌(AMF)的影响,在不同的增氮增雨处理下,表现出增加的变化趋势,增氮使得丛枝菌根真菌增加比例为 43.31%和 9.57%,增雨的增加效应为 49.16%和 52.21%。

2 草地土壤微生物群落结构与功能多样性变化

土壤微生物多样性是指土壤生态系统中所有的微生物种类和它们拥有的基因以及这些微生物与环境之间相互作用的多样化程度。当前研究主要集中在物种多样性、结构多样性、遗传多样性及功能多样性等 4 个方面^[35]。土壤微生物对外界条件的变化非常敏感,对土壤环境胁迫反应强烈,其最显著的特点是群落结构的变化^[36]。环境中微生物的群落结构及多样性和微生物的功能及代谢机理是微

生物生态学的研究热点。

2.1 降水增加对草地土壤微生物群落结构与功能多样性的影响

降水格局改变对生态系统的影响是通过水分进入土壤,加速土壤中各种营养物质的溶解,从而提高土壤中有机碳含量而实现的^[37]。降水对土壤微生物群落多样性的影响主要包括短期影响和长期影响。短期影响指降水在短时间内形成干湿交替,使不能适应环境中水势快速变化的微生物种群迅速减少,从而导致微生物群落中某一或某些微生物种群的消失;长期影响主要是通过引起土壤理化性质、地上植被的生长状态和多样性发生改变,促使微生物生长环境发生变化,进而影响到微生物种群结构的稳定性^[38]。Fierer 等^[39]对草地土壤在两个月内进行的 15 次干湿交替循环处理研究发现,草地土壤微生物群落结构未受到干湿交替处理的显著影响,主要原因可能是试验土壤经常受到干湿胁迫,土壤微生物群落能较好地适应环境。Cruz-Martínez 等^[40]则指出,在进行了连续 5 年的降水试验后,降水增加未对土壤细菌(Bacteria)和古菌(Archaea)群落产生显著影响。这可能是由于土壤中微生物受到当地环境影响,本身也产生了一定的对环境和植物变化的适应能力。除了降水时间,降雨量和雨前土壤含水量也是土壤微生物群落的重要影响因子,土壤水分含量较高且雨量较大时明显抑制土壤微生物多样性,如果雨前土壤水分处于近饱和状态,即使少量的降水也会抑制土壤微生物多样性^[41]。然而在澳大利亚新南威尔士州草地,则发现降雨量对土壤微生物多样性并没有显著影响^[42]。杨山^[43]在研究降水对内蒙古典型草原土壤微生物特性的影响时发现,增加降水使丛枝菌根真菌物种丰富度平均升高 40% ($P < 0.05$);厌氧菌、真核细胞和放线菌的相对物种丰富度在增水条件下分别降低 9%、22%和 7%,并且增加降水显著降低厌氧菌的物种丰富度($P < 0.05$)。Thomson 等^[44]对草地土壤进行干湿处理后发现 α -变形菌(Alpha proteobacteria)和 γ -变形菌(Gamma proteobacteria)相对丰度增加。

Biolog 分析方法用于表征土壤微生物群落的功能潜力,是一种群落水平的生理特性分析方法。它基于微生物利用碳源能力的不同来研究微生物的碳源利用模式^[45]。适当的水分添加也可以提高植物生产力,增加土壤有机碳含量,而有机碳含量高的土壤能提供更多的有效碳源,有利于保持相对高的微生物活性^[46]。Cederlund 等^[47]的研究表明,含水量高的土壤有较高的微生物量与微生物活性。有研究发现土壤湿度在调节微生物活性与多样性方面至关重要,它直接影响微生物的生理状态,限制微生物分解某些化合物的能力,同时调节土壤酶和土壤理化性质。

2.2 氮沉降增加对草地土壤微生物群落结构与功能多样性的影响

施肥能够改善土壤养分贫瘠状况,促进草地植被的生长,从而造成土壤微生物群落发生变化。然而,不同施肥量、施肥方式、肥料类型、施肥时间、草地初始养分等均会对土壤微生物多样性产生明显的影响^[48]。施氮肥可显著促进新疆荒漠草原土壤微生物群落多样性^[49]。Freitag 等^[50]对瑞典一个长期实验草地的研究发现氮添加增加了土壤细菌,尤其是细菌功能群的多样性。有研究发现,低氮处理土壤氨氧化细菌多样性指数较高,高氮添加条件下土壤氨氧化细菌多样性降低;而土壤氨氧化古菌在高氮添加条件下生长更活跃,而且多样性增加^[51]。近年来,随着微生物监测分离技术的发展,有关氮沉降对某些特定微生物菌群丰度变化的影响有了进一步的研究,对内蒙古经过 6 年施氮的半干旱温带草原的研究结果显示,氨氧化细菌(Ammonium-oxidizing bacteria, AOB)的多度随施 N 水平的增加呈上升趋势,而氨氧化古菌(Ammonia-oxidizing archaea, AOA)的多度则无明显变化^[52]。Di 等^[53]也发现施 N 会增加新西兰高 N 草地土壤中 AOB 的多度。

Clegg 等^[54]运用 DGGE 和 PLFA 技术研究了长期草地管理模式对土壤微生物群落结构的影响,结果表明施氮对放线菌群落结构有显著的影响,以 PLFA 数据为基础的多元分析表明施氮能够显著地改变微生物群落结构。Smolander 等^[55]认为,施氮

后尽管土壤有机质有所增加,但不易被土壤微生物分解利用,且土壤 pH 值下降,因而导致微生物群落结构的改变,然而长期、慢性 N 沉降会大大降低草地微生物物种丰富度^[56]。N 素输入在多大水平时能够干扰植被-土壤物种多样性,且不危害其平衡状态、微生物对 N 素输入时间的响应及其反馈调节机制都是未来值得关注的问题^[57]。

2.3 水、氮交互作用对草地土壤微生物群落结构与功能多样性的影响

水、氮变化对土壤微生物群落结构的交互作用可能表现为叠加、协同或者拮抗。在中国北方草甸草原,增水增氮对微生物群落结构多样性的交互作用表现为拮抗,微生物群落结构水分含量以及自然降水格局的变化更加敏感^[58]。Bi 等^[59]应用 Biolog 技术研究了连续 2 年水分与氮素添加处理对贝加尔针茅草原土壤微生物功能多样性的影响,结果表明水分添加能够减少氮肥对微生物的抑制作用,增强微生物的代谢活性和微生物对碳源的利用能力,高氮处理下微生物群落丰富度指数和均匀度指数降低,而优势度指数升高。水分与氮素添加处理不仅改变了微生物的功能多样性,也使微生物对碳源的利用模式发生转变^[60]。目前关于水、氮交互作用对草地生态系统土壤微生物群落的影响,尤其是针对不同草原类型的研究,还存在很大的空白。因此,有必要选取不同类型的草原作为研究对象,弥补地域差异性的不足,系统地探讨草原土壤微生物群落对降水和大气氮沉降增加的响应。

3 草地土壤酶活性变化

为有效研究和应用各种酶,国际酶学委员会于 1961 年提出了一个分类系统,按照酶的催化反应类型和功能,把已知的酶分为六大类,即氧化还原酶、水解酶、转移酶、裂合酶、连接酶和异构酶^[61]。草地生态系统土壤酶活性的高低与草地土壤肥力密切相关,也是判别草地土壤肥力与土壤质量的重要指标之一。

3.1 降水格局改变对草地土壤酶活性的影响

土壤水分含量对土壤酶活性有重要影响,水分

不仅直接参与土壤养分的生化反应,还能通过影响微生物和植物根系的生命活动影响土壤酶活性。有研究表明,增加降水明显增强了内蒙古温带草原 0–10 cm 土壤的 N-乙酰氨基酶、亮氨酸酶和碱性磷酸酶活性,以及 10–20 cm 土壤的 N-乙酰氨基酶、亮氨酸酶和酸性磷酸酶活性^[62]。Henry 等^[63]在草地生态系统的土壤酶研究中发现,与未增加降水相比,增加降水使水解酶活性下降,而酚氧化酶和过氧化物酶的活性增大;并认为增水引起植物根生物量减少,进而导致了土壤水解酶活性降低。土壤含水量的变化除了通过对微生物的调节而影响土壤酶活性外,还可以通过影响土壤的含氧状态以及引起土壤淋溶作用等而改变土壤酶活性,降水量增加在一定程度上容易使土壤形成厌氧环境,从而抑制土壤酶的活性^[64],所以,在通气性较好的条件下,土壤酶活性一般较高,而完全浸水和干湿交替存在的条件下土壤酶活性则较低^[65]。Freeman^[66]的研究发现,土壤环境中的可利用性氧气含量能明显影响酚氧化酶的活性,这是因为有氧环境可以使酚氧化酶在催化过程中获得更多的可利用性氧,进而提高了酚氧化酶的活性。侯乐和张玉龙研究表明,多数土壤酶适宜的水分含量是土壤最大持水量的 60%–80%^[67]。另外,土壤含水量增加会通过促进淋溶作用而降低微生物对相应资源的需求,进而减少土壤微生物合成与产出酶类物质,但由土壤含水量上升而引起的土壤酶的活性升高效果却更为显著^[68]。

3.2 氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响

N 作为营养物质输入到土壤中,满足作物生长需要的同时,也会影响土壤的生态结构和功能,改善土壤的理化特性和微生物区系,从而对土壤酶活性产生影响。N 素不仅是土壤酶的组成部分,而且累积在土壤有机质中的 N 还决定了酶进入土壤中的数量^[69]。不同水平的氮沉降对土壤酶活性的影响不同^[70],过量氮沉降会改变微生物功能,降低土壤酶活性^[71]。赵玉涛等^[72]研究发现高氮沉降能降低土壤多酚氧化酶活性,且土壤蔗糖酶活性也有降低的趋势。白春华等^[73]对内蒙古荒漠草原的研究发

现,施氮量为 10 g N/(m²·yr)提高了土壤脲酶活性,对蔗糖酶和过氧化氢酶的影响不明显。由于酶活性受到温度、pH 等多种因素影响,因此季节变化也会使酶活性产生较大波动。研究冻融作用下氮沉降对东北松嫩羊草草原土壤酶活性影响发现,随着氮沉降量的升高,土壤脲酶和蛋白酶活性均呈先升高后降低的趋势,土壤脲酶和蛋白酶活性在秋冬冻融循环时期和冬春冻融循环时期差异显著。根据不同施肥量对海北州海晏县天然草地上土壤酶活性的测定结果表明,天然草地土壤施氮肥后,脲酶与蔗糖酶活性受到抑制,而磷酸酶活性受到促进^[74]。不同形式的氮素添加也会对土壤酶活性产生不同的影响,Wang 等^[75]发现混合形式的氮比单一形式氮对过氧化氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、多酚氧化酶、硝酸还原酶、脲酶和酸性磷酸酶的影响更大。

3.3 水、氮交互作用对草地土壤酶活性的影响

通过研究贝加尔针茅草甸草原土壤水解酶活性以及季节动态变化对不同梯度增氮增雨的响应,发现适度增氮能够促进水解酶活性,但是增雨在一定程度上会掩盖增氮的正效应,即未来该地区降水量的增加将会中和或抑制大气氮沉降增加对土壤水解酶活性的促进效应^[76]。

4 土壤微生物与酶活性的关系

从 20 世纪 60 年代开始,随着酶活性和微生物新的测试技术的发展,研究者们已经清楚认识到土壤酶与土壤生物之间存在某些密切关系。通常认为土壤酶在很大程度上起源于土壤微生物,同样它也可能来源于植物和土壤动物^[77]。土壤温度、水分、pH、放牧、开垦、施肥、植被类型、植物多样性、群落结构、外来入侵植物、植物根际等各种非生物、生物及人类活动因素变化均会对土壤微生物数量和多样性产生影响,而土壤微生物发生的一系列生化反应主要依赖于土壤酶活性的变化^[78]。微生物群落结构组成的改变也会影响土壤酶的产出及酶种类的多样性^[79]。

许多研究已经证明土壤微生物数量、微生物量

及其多样性与土壤酶活性有着密切联系,在伊犁绢蒿荒漠退化草地,土壤细菌与脲酶呈显著正相关($P<0.05$),真菌与过氧化氢酶、脲酶呈显著负相关^[80]。高寒草地土壤细菌、真菌、总微生物数量与过氧化氢酶、脲酶、中性磷酸酶呈显著或极显著相关,这在很大程度上反映了微生物量对土壤酶活性的重要影响和贡献^[81]。贝加尔针茅草原土壤中固氮菌、真菌的数量与土壤脲酶活性分别具有极显著和显著正相关^[82]。王杰等^[83]在内蒙古贝加尔针茅草原研究水分和氮素添加对草原土壤养分、酶活性及微生物量碳、氮的影响时得出,微生物量氮含量与过氧化氢酶和磷酸酶活性呈显著正相关,与多酚氧化酶呈负相关;微生物量碳与过氧化氢酶呈负相关,与多酚氧化酶活性呈正相关。

5 研究展望

从上述分析可以看出,未来降水和氮沉降增加会对草地土壤微生物数量、微生物量及其多样性和土壤酶活性产生深远影响。伴随着全球变化研究的展开,气候因素变化对草地生态系统中土壤环境、土壤质量等的影响引起越来越多国内外研究者的关注。然而目前,有关水、氮变化情景下草地土壤微生物生态学与酶活性变化研究的广度和深度仍然十分局限,对于生境较为脆弱的草地生态系统,希望在未来的工作中可以对以下科学问题进行更多关注与研究:

(1) 结合多种研究方法,特别是较为先进的分子生物学相关分析方法,从不同层面对环境微生物多样性的变化进行分析,克服单一方法所带来的不足与缺陷,从而得到更加真实和全面的信息。

(2) 针对不同微生物的功能多样性进行更加深入的机理研究,以便为精准地研究不同微生物类群的变化可能带来的植物生长、温室气体排放以及土壤营养物质含量的变化,起到更科学的指导作用。

(3) 在酶活性研究方面,找到一个合理、准确和应用范围广的综合性酶活性指标,来表征环境变化条件下土壤生物化学等所表征的土壤质量方面的变化。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climatic Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] Bai YF, Wu JG, Clark CM, et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands[J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358-372
- [3] Saiya-Cork KR, Sinsabaugh RL, Zak DR. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309-1315
- [4] Liu N, Zhang YJ. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(4): 11-14 (in Chinese)
刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14
- [5] Xu Z. Go Forward the 21st Century's Chinese grassland resources[J]. Grassland of China, 1998(5): 1-8 (in Chinese)
徐柱. 面向 21 世纪的中国草地资源[J]. 中国草地, 1998(5): 1-8
- [6] Yao HY, Huang CY. Microbial Ecology and Experimental Techniques[M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [7] Badiane NNY, Chotte JL, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in sem-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 229-238
- [8] Xu GH, Zheng HY. Microbial Analysis Handbook[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 23-25 (in Chinese)
许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 23-25
- [9] He ZL. Microbial biomass and its significance in nutrient cycling and environmental quality assessment[J]. Soil, 1997, 29(2): 837-842 (in Chinese)
何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. 土壤, 1997, 29(2): 837-842
- [10] Wang XL, Hu F, Li HX, et al. Effects of different land used patterns on soil microbial biomass carbon and nitrogen in small red soil watershed[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 143-147 (in Chinese)
王晓龙, 胡峰, 李辉信, 等. 红壤小流域不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 143-147
- [11] Chen QS, Wang QB, Han XG, et al. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern china[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(2): 1-11
- [12] Gömöryová E, Gregor J, Pichler V, et al. Spatial patterns of soil microbial characteristics and soil moisture in a natural beech forest[J]. Biologia, 2006, 61(S19): S329-S333
- [13] Wang SK, Zhao XY, Zuo XA, et al. Vertical distribution and seasonal dynamics of soil microbial number in sandy grassland of Horqin[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 610-615 (in Chinese)
王少昆, 赵学勇, 左小安, 等. 科尔沁沙质草甸土壤微生物数量的垂直分布及季节动态[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 610-615
- [14] Zhang CB. Dynamics of soil microbial quantity in northeast chinensis steppe[J]. Journal of Keshan Junior Teachers' College, 1999(3): 7-10 (in Chinese)
张崇邦. 东北羊草草原土壤微生物数量动态的研究[J]. 克山师专学报, 1999(3): 7-10
- [15] Bapiri A, Bååth E, Rousk J. Drying-rewetting cycles affect fungal

- and bacterial growth differently in an arable soil[J]. *Microbial Ecology*, 2010, 60(2): 419-428
- [16] Zhang QS, Zak JC. Effects of water and nitrogen amendment on soil microbial biomass and fine root production in a semi-arid environment in West Texas[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(1): 39-45
- [17] Kieft TL, Soroker E, Firestone MK. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2): 119-126
- [18] Dijkstra FA, Augustine DJ, Brewer P, et al. Nitrogen cycling and water pulses in semiarid grasslands: are microbial and plant processes temporally asynchronous?[J]. *Oecologia*, 2012, 170(3): 799-808
- [19] He YT, Dong YS, Qi YC, et al. Advances in researches on soil microbial biomass of grassland ecosystems and its influencing factors[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1350-1359 (in Chinese)
何亚婷, 董云社, 齐玉春, 等. 草地生态系统土壤微生物量及其影响因子研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1350-1359
- [20] Bardgett RD, Denton CS, Cook R. Below-ground herbivory promotes soil nutrient transfer and root growth in grassland[J]. *Ecology Letters*, 1999, 2(6): 357-360
- [21] Yoshida LC, Allen EB. Response to ammonium and nitrate by a mycorrhizal annual invasive grass and native shrub in southern California[J]. *American Journal of Botany*, 2001, 88(8): 1430-1436
- [22] Guo YS, Li JH, Li LH, et al. Effects of nitrogen fertilization on desert grassland soil microbial population and microbial biomass[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(1): 79-85 (in Chinese)
郭永盛, 李俊华, 李鲁华, 等. 施氮肥对荒漠草原土壤微生物种群及微生物量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(1): 79-85
- [23] Zhou XB, Zhang YM, Downing A. Non-linear response of microbial activity across a gradient of nitrogen addition to a soil from the Gurbantunggut Desert, northwestern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 67-77
- [24] Treseder KK. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1111-1120
- [25] Li LJ, Zeng DH, Yu ZY, et al. Soil microbial properties under N and P additions in a semi-arid, sandy grassland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(6): 653-658
- [26] McCrackin ML, Harms TK, Grimm NB, et al. Responses of soil microorganisms to resource availability in urban, desert soils[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 87(2): 143-155
- [27] He YT, Qi YC, Dong YS, et al. Advances in the influence of external nitrogen input on soil microbiological characteristics of grassland ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8): 877-885 (in Chinese)
何亚婷, 齐玉春, 董云社, 等. 外源氮输入对草地土壤微生物特性影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 877-885
- [28] Zhang NL, Wan SQ, Li LH, et al. Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1): 19-28
- [29] Zhang YD, Sun ZH, Shen YX. Effect of fertilization on soil microorganism of deteriorated grassland in Dry-Hot Valley Region of Jinsha River[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(2): 88-91 (in Chinese)
张彦东, 孙志虎, 沈有信. 施肥对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 88-91
- [30] Wang CH, Zhu F, Zhao X, et al. The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of loess plateau of northern china[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 419-425
- [31] Lovell RD, Jarvis SC. Effect of cattle dung on soil microbial biomass C and N in a permanent pasture soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(3): 291-299
- [32] Cai XB, Zhou J, Qian C. Variation of soil microbial activities in alpine steppes different in degradation intensity in the north Tibet plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1110-1118 (in Chinese)
蔡晓布, 周进, 钱成. 不同退化程度高寒草原土壤微生物活性变化特征研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1110-1118
- [33] Nemergut DR, Townsend AR, Sattin SR, et al. The effects of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: implications for carbon and nitrogen cycling[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(11): 3093-3105
- [34] Chen ML. Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation on plant community, soil and soil fungal community in a *Stipa baicalensis* grassland[D]. Changchun: Master's Thesis of Northeast Normal University, 2013 (in Chinese)
陈美玲. 模拟增氮和增雨对贝加尔针茅草甸草原的植被、土壤以及土壤真菌群落的影响[D]. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2013
- [35] Lin XG, Hu JL. Scientific connotation and ecological service function of soil microbial diversity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 892-900 (in Chinese)
林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 892-900
- [36] Joergensen RG, Emmerling C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(3): 295-309
- [37] Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, et al. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 13-22
- [38] Sun LJ, Qi YC, Dong YS, et al. Research progresses on the effects of global change on microbial community diversity of grassland soils[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1715-1723 (in Chinese)
孙良杰, 齐玉春, 董云社, 等. 全球变化对草地土壤微生物群落多样性的影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1715-1723
- [39] Fierer N, Schimel JP, Holden PA. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure[J]. *Microbial Ecology*, 2003, 45(1): 63-71
- [40] Cruz-Martínez K, Suttle KB, Brodie EL, et al. Despite strong seasonal responses, soil microbial consortia are more resilient to long-term changes in rainfall than overlying grassland[J]. *The ISME Journal*, 2009, 3(6): 738-744
- [41] Wang YD, Wang HM, Ma ZQ, et al. Review of response mechanism of soil respiration to rainfall[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 601-610 (in Chinese)
王义东, 王辉民, 马泽清, 等. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610
- [42] Banu NA, Singh B, Copeland L. Microbial biomass and microbial biodiversity in some soils from New South Wales, Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, 42(7): 777-782
- [43] Yang S. Effects of water and fertilizer addition on soil microbiological characteristics in a typical grassland of Inner Mongolia[D]. Shenyang: Master's Thesis of Shenyang University, 2014 (in Chinese)
杨山. 水肥添加对内蒙古典型草原土壤微生物学特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳大学硕士学位论文, 2014
- [44] Thomson BC, Ostle NJ, McNamara NP, et al. Effects of sieving, drying and rewetting upon soil bacterial community structure and respiration rates[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2010, 83(1): 69-73
- [45] Zhong WH, Cai ZC. Methods for studying soil microbial diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5):

- 899-904 (in Chinese)
钟文辉, 蔡祖聪. 土壤微生物多样性研究方法[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 899-904
- [46] Vanegas J, Landazabal G, Melgarejo LM. Structural and functional characterization of the microbial communities associated with the upland and irrigated rice rhizospheres in a neotropical Colombian savannah[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 55: 1-8
- [47] Cederlund H, Thierfelder T, Stenström J. Functional microbial diversity of the railway track bed[J]. Science of The Total Environment, 2008, 397(1/3): 205-214
- [48] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 453-461
- [49] Guo YS. Effects of nitrogen fertilization on desert grassland ecosystem biodiversity in Xinjiang[D]. Shihezi: Master's Thesis of Shihezi University, 2011 (in Chinese)
郭永盛. 施氮肥对新疆荒漠草原生物多样性的影响[D]. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2011
- [50] Freitag TE, Chang LS, Clegg CD, et al. Influence of inorganic nitrogen management regime on the diversity of nitrite-oxidizing bacteria in agricultural grassland soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(12): 8323-8334
- [51] Wang J. Effects of nitrogen and water additions on soil bacterial diversity in *Stipa baicalensis* steppes, Inner Mongolia of North China[D]. Beijing: Master's Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014 (in Chinese)
王杰. 氮素和水分添加对内蒙古贝加尔针茅草原土壤细菌多样性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2014
- [52] Shen XY, Zhang LM, Shen JP, et al. Nitrogen loading levels affect abundance and composition of soil ammonia oxidizing prokaryotes in semiarid temperate grassland[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(7): 1243-1252
- [53] Di HJ, Cameron KC, Shen JP, et al. Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(9): 621-624
- [54] Clegg CD, Lovell RDL, Hobbs PJ. The impact of grassland management regime on the community structure of selected bacterial groups in soils[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 43(2): 263-270
- [55] Smolander A, Kurka A, Kitunen V, et al. Microbial biomass C and N, and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N and P-fertilized Norway spruce stands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(8): 957-962
- [56] Chung H, Zak DR, Reich PB, et al. Plant species richness, elevated CO₂, and atmospheric nitrogen deposition alter soil microbial community composition and function[J]. Global Change Biology, 2007, 13(5): 980-989
- [57] Zak DR, Holmes WE, White DC, et al. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: Are there any links?[J]. Ecology, 2003, 84(8): 2042-2050
- [58] Sun SN. Response of soil microbial community structure and diversity to nitrogen addition and increased precipitation on meadow steppe[D]. Changchun: Doctoral Dissertation of Northeast Normal University, 2015 (in Chinese)
孙盛楠. 草甸草原土壤微生物群落结构与多样性对增氮增雨的影响[D]. 长春: 东北师范大学博士学位论文, 2015
- [59] Bi J, Zhang NL, Liang Y, et al. Interactive effects of water and nitrogen addition on soil microbial communities in a semiarid steppe[J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 5(3): 320-329
- [60] Wang J, Li G, Xiu WM, et al. Responses of soil microbial functional diversity to nitrogen and water input in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia, Northern China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(4): 343-350 (in Chinese)
王杰, 李刚, 修伟明, 等. 贝加尔针茅草原土壤微生物功能多样性对氮素和水分添加的响应[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 343-350
- [61] Xu Y, Xiang CH, Li XW. Advances in soil enzymology[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2010, 31(2): 14-20 (in Chinese)
徐雁, 向成华, 李贤伟. 土壤酶的研究概况[J]. 四川林业科技, 2010, 31(2): 14-20
- [62] Zhou XQ, Chen CR, Wang YF, et al. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 552-558
- [63] Henry HAL, Juarez JD, Field CB, et al. Interactive effects of elevated CO₂, N deposition and climate change on extracellular enzyme activity and soil density fractionation in a California annual grassland[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1808-1815
- [64] Freeman C, Ostle N, Kang H. An enzymic 'latch' on a global carbon store[J]. Nature, 2001, 409(6817): 149
- [65] Gutknecht JLM, Henry HAL, Balser TC. Inter-annual variation in soil extra-cellular enzyme activity in response to simulated global change and fire disturbance[J]. Pedobiologia, 2010, 53(5): 283-293
- [66] Freeman M. Structural biology: Enzyme theory holds water[J]. Nature, 2006, 444(7116): 153-155
- [67] Hou L, Zhang YL. Effects of irrigation methods on enzyme in protected soil[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(11): 108-111 (in Chinese)
侯乐, 张玉龙. 灌水方法对保护地土壤酶活性的影响[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(11): 108-111
- [68] Henry HAL, Cleland EE, Field CB, et al. Interactive effects of elevated CO₂, N deposition and climate change on plant litter quality in a California annual grassland[J]. Oecologia, 2005, 142(3): 465-473
- [69] Wan ZM, Song CC. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 951-956 (in Chinese)
万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 951-956
- [70] Song XG, Hu TX, Xian JR, et al. Soil enzyme activities and its response to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest, southern Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1234-1240 (in Chinese)
宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 等. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1234-1240
- [71] Xue JH, Mo JM, Li J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil microorganism[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(5): 777-782 (in Chinese)
薛璟花, 莫江明, 李炯, 等. 氮沉降增加对土壤微生物的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(5): 777-782
- [72] Zhao YT, Li XF, Han SJ, et al. Soil enzyme activities under two forest types as affected by different levels of nitrogen deposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2769-2773 (in Chinese)
赵玉涛, 李雪峰, 韩士杰, 等. 不同氮沉降水平下两种林型的主要土壤酶活性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2769-2773
- [73] Bai CH, Hong M, Han GD, et al. Response of three kinds of enzyme activity to simulate warming and nitrogen addition[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2012, 43(5): 509-513 (in Chinese)
白春华, 红梅, 韩国栋, 等. 土壤三种酶活性对温度升高和氮肥添加的响应[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2012, 43(5): 509-513
- [74] Pei HK. Effect of different fertilizer on enzymatic activity of grassland[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary

- Sciences, 2001, 31(2): 15-16 (in Chinese)
裴海昆. 不同施肥量对天然草地土壤酶活性的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2001, 31(2): 15-16
- [75] Wang CY, Han GM, Jia Y, et al. Response of litter decomposition and related soil enzyme activities to different forms of nitrogen fertilization in a subtropical forest[J]. Ecological Research, 2011, 26(3): 505-513
- [76] Li J. Response of soil hydrolase activity to simulated nitrogen deposition and increased precipitation in a *Stipa baicalensis* meadow steppe[D]. Changchun: Master's Thesis of Northeast Normal University, 2015 (in Chinese)
李健. 贝加尔针茅草甸草原土壤水解酶活性对增氮增雨的响应[D]. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2015
- [77] Xiang ZY, Wang CT, Song WB, et al. Advances on soil enzymatic activities in grassland ecosystem[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(10): 1801-1806 (in Chinese)
向泽宇, 王长庭, 宋文彪, 等. 草地生态系统土壤酶活性研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1801-1806
- [78] Han CC, Yang Y, Liu BR, et al. Influencing factors of soil microbial diversity in grassland[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(12): 2242-2250 (in Chinese)
韩丛丛, 杨阳, 刘秉儒, 等. 草地土壤微生物多样性影响因子[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2242-2250
- [79] Weintraub MN, Scott-Denton LE, Schmidt SK, et al. The effects of tree rhizodeposition on soil exoenzyme activity, dissolved organic carbon, and nutrient availability in a subalpine forest ecosystem[J]. Oecologia, 2007, 154(2): 327-338
- [80] Fan YM, Zhu JZ, Wu HQ, et al. Study on soil microorganisms and enzyme activities of the degraded *Seriphidium transiliense* desert grassland[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 46(6): 1288-1293 (in Chinese)
范燕敏, 朱进忠, 武红旗, 等. 对伊犁绢蒿荒漠退化草地土壤微生物和酶活性的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6): 1288-1293
- [81] Feng RZ, Zhou WH, Long RJ, et al. Characteristics of soil physical, chemical and biological properties on degraded alpine meadows in the Headwater Areas of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 263-269 (in Chinese)
冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269
- [82] Wendu RL, Zhang JN, Li G, et al. Effect of grazing disturbance on soil microorganisms and soil enzyme activities of *Stipa baicalensis* Rosev. steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(4): 517-522 (in Chinese)
文都日乐, 张静妮, 李刚, 等. 放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 517-522
- [83] Wang J, Li G, Xiu WM, et al. Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia of North China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(3): 237-245 (in Chinese)
王杰, 李刚, 修伟明, 等. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(3): 237-245