

# 若尔盖高原湿地生态系统研究综述

马骅<sup>1,2</sup>, 王义飞<sup>1,2\*</sup>, 李肖夏<sup>1,2</sup>, 宁宇<sup>1,2</sup>, 赵娜娜<sup>1,2</sup>, 武高洁<sup>1,2</sup>, 索郎夺尔基<sup>3</sup> (1. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091; 2. 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091; 3. 若尔盖湿地国家级自然保护区管理局, 四川若尔盖 624500)

**摘要** 从湿地分类、湿地生物、湿地生境以及湿地退化 4 个方面对近年来若尔盖的科研成果进行阐述和总结, 最后对若尔盖湿地研究的发展进行展望。

**关键词** 若尔盖高原湿地; 生态系统; 研究进展

**中图分类号** S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)29-0031-04

## Research Review of the Zoige Plateau Wetland Ecosystem

MA Hua<sup>1,2</sup>, WANG Yi-fei<sup>1,2\*</sup>, LI Xiao-xia<sup>1,2</sup> et al (1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091)

**Abstract** The research achievements of Zoige in recent years were elaborated and summarized from 4 aspects of wetland classification, wetland biology, wetland habitat and wetland degradation, the research direction in the future was forecasted.

**Key words** Zoige Plateau wetland; Ecosystem; Research advances

若尔盖高原海拔 3 400 ~ 3 900 m, 行政上隶属于四川省若尔盖县、红原县、阿坝县, 甘肃省西南部的玛曲县、碌曲县以及青海省东南部的久治县<sup>[1]</sup>。若尔盖高原湿地地处黄河上游、青藏高原东北部, 其沼泽地区的草根层和泥炭层具有巨大的持水与蓄水能力, 蓄水总量近 100 亿 m<sup>3</sup>, 是我国第一大高原沼泽湿地。有研究表明, 恢复后的若尔盖湿地草甸土、沼泽土和泥炭土的有效水分含量分别可达到 330、425 和 690 g/kg 以上<sup>[2]</sup>。因此, 若尔盖湿地是青藏高原重要的生态蓄水池, 也是长江、黄河上游地区最重要的水源供给区, 被国内外学者誉为“中国西部高原之肾”<sup>[3]</sup>。

近年来, 由于全球气候环境的变化以及人类活动的干扰, 导致出现冰川积雪线退缩、湿地萎缩、草场退化、土地沙化以及水土流失等一系列生态退化问题, 青藏高原生态环境整体趋向恶化。若尔盖地区又是青藏高原响应气候变化的敏感地带, 其生态环境退化比较严重。若尔盖高原湿地以其独特的地质、气候、水文自然地理条件为珍稀野生动植物的生存、繁殖创造了得天独厚的环境。因此, 保护好若尔盖湿地已成为一项重要且紧迫的任务。目前, 许多国内学者已经在若尔盖湿地开展了多项研究。基于此, 笔者从湿地分类、湿地生物、湿地生境以及湿地退化 4 个方面对近年来若尔盖的科研成果进行阐述与回顾, 并对若尔盖湿地研究的发展进行展望, 以期为该地区的生态系统研究提供参考。

## 1 湿地分类研究

湿地分类作为研究湿地的重要基础, 一直以来都受到国内外专家学者的高度重视。最早的较为完整的湿地分类研究见于美国鱼和野生动物管理局于 20 世纪 50 年代初发表

的《39 号通告》, 将其湿地划分为 20 种类型, 至今仍是美国主要湿地分类的基础<sup>[4]</sup>。虽然近些年来我国对于高原地区湿地的研究逐渐增多, 但是有关高原湿地分类的研究报道却不多。国内研究若尔盖高原湿地分类的文献大都是从特定的研究目的出发对湿地类型进行划分, 且主要是针对若尔盖高原湿地景观格局变化进行研究。这类研究的重点是湿地的结构和功能, 很少关注湿地景观分类的差异对研究结果的影响, 所以这些研究只是将湿地景观简单地划分为河流、湖泊、沼泽、沼泽化草甸、水田、水库和坑塘等<sup>[5-7]</sup>。而另一些湿地分类并没有统一的量化标准, 主要是凭借研究者经验性的观察与判断来对若尔盖湿地进行分类。李玫等<sup>[8]</sup>根据若尔盖龙日坝地区湿地退化程度的不同将其分为 3 种不同类型, 即较多地表积水且苔草生长相对茂盛的轻度退化湿地区、少量地表积水且苔草稀疏生长的中度退化湿地区、干旱且无苔草生长的严重退化湿地区。周华茂等<sup>[9]</sup>在调查若尔盖湿地资源时, 根据沼泽发育程度的不同将其分为极强度发育沼泽、强度发育沼泽、中度发育沼泽、弱度发育沼泽、极弱度发育沼泽 5 个小类。因此对若尔盖湿地类型的划分并没有统一客观的标准, 这方面仍需系统性研究。

## 2 湿地生物研究

**2.1 植物** 若尔盖湿地中植物约有 25 科 69 种, 其中莎草科 13 种、菊科 5 种、毛茛科 7 种、伞形科 4 种、蓼科 3 种、禾本科 4 种、灯心草科 3 种、玄参科 2 种、参科 3 种、石竹科及天南星科等其他科 25 种。其中, 具有药用价值的植物极为丰富, 有黄芪、黄连、贝母、羌活等<sup>[10]</sup>。

近年来, 对若尔盖高原湿地植被全面调查的科研成果很少, 研究重点更偏向于湿地环境变化对植被多样性的影响方面。其中, 人类活动的干扰对植物组成以及多样性的影响研究相对较多。干友民等<sup>[11]</sup>对若尔盖沙化地区内的植物群落指标进行了调查, 发现生态恢复工程增加了样地内植物种类、多样性指数、群落总盖度以及地上部分生物量。王乾等<sup>[12]</sup>对国道 213 线花湖湿地景区段道路周边的植被进行了调查, 发现物种的丰度并未表现出明显的梯度, 显示出道路

**基金项目** 国家林业局 948 项目(2014-4-67)。

**作者简介** 马骅(1989-), 男, 陕西绥德人, 研究实习员, 硕士, 从事湿地环境科学研究。\* 通讯作者, 副研究员, 博士, 从事湿地动物生态学研究。

**鸣谢** 该课题依托若尔盖高寒湿地生态系统定位观测研究站, 且得到若尔盖湿地国家级自然保护区管理局的大力帮助, 作者在此表示感谢。

**收稿日期** 2016-08-26

对植被的均质化作用。而韩大勇等<sup>[13]</sup>的研究表明,放牧压力改变了植物群落物种的丰富度、生活型组成和演替模式。其他研究也均表明当地气候变化和动物活动对植被的组成和分布具有一定影响,如林春英等<sup>[14]</sup>的研究发现,气候变化在一定程度上导致了黄河上游河曲地区湿地植被组成中原生植物的减少及菊科等杂类草的增多;而崔丽娟等<sup>[15]</sup>在研究若尔盖沼泽植物群落与环境因子的关系中发现,沼泽植物群落物种多样性除了受土壤水分和养分条件的影响以外,啮齿动物的活动也可能对若尔盖沼泽物种的分布以及促进群落进一步演替具有一定的影响。无论是气候变化还是人类干扰,植物都会对周边环境的变化作出响应,这也使其成为研究若尔盖湿地退化原因与机制的重要指标之一。

**2.2 动物** 根据对若尔盖湿地的调查结果显示,该地区鸟类有162种,哺乳类有62种,鱼类有19种,爬行类有4种,两栖类有4种,其中黑颈鹤为世界特有种<sup>[16]</sup>。

近年来,有关若尔盖湿地动物的研究多侧重于环境变化对土壤动物群落的影响以及鸟类分布调查等方面。土壤动物是陆地生态系统中物质循环和能量流动的重要组成部分,也是整个生态系统演化的重要驱动因子,其对研究若尔盖高原湿地土壤环境变化具有重要意义<sup>[17]</sup>。若尔盖高原草甸的不同退化阶段大型土壤动物群落的类群组成和优势类群存在差异,其中土壤理化性质及地下生物量是影响其群落多样性及功能群结构的重要因素;而对于群落组成和多样性具有明显季节特征的中小型土壤动物来说,温度是影响其季节变化的最主要气候因素<sup>[18-19]</sup>。这些研究结果均表明若尔盖高寒湿地的退化会降低土壤动物群落的组成种类和结构复杂性,进而将会影响其生态服务功能。在鸟类分布调查方面,张国钢等<sup>[21]</sup>对若尔盖湿地水鸟种类、数量和分布进行了较为系统地调查,共记录到48种26050只水鸟,隶属于6目12科,其中雁鸭类水鸟最多,共统计到21408只,占水鸟总数的82.2%。窦亮等<sup>[22]</sup>也对若尔盖湿地国家级自然保护区内的黑颈鹤数量及分布进行了调查,共记录到287只黑颈鹤,此次的调查结果显示黑颈鹤分布范围并没有太大的变化。虽然这些调查结果均显示若尔盖湿地鸟类并未呈现出较为明显的下降趋势,但是随着湿地面积以及景观多样性的下降,濒危鸟类的繁衍与生存都会受到潜在的威胁。

### 3 湿地生境研究

**3.1 水文** 水文是湿地环境中关键的生态因子,其可决定湿地的类型和特征。若尔盖湿地内大小河流约430条,多属黄河水系,其中黑河与白河为黄河上游流量较大的两大支流。区内湖泊小而多,多为小沼泽、牛轭湖和海子,总水面积约4880 hm<sup>2</sup>,而地下水主要来自于降水和地表河、湖入渗补给。近年来对于若尔盖湿地水文的研究主要侧重于湿地退化对河流径流变化和土壤含水量的影响方面。若尔盖湿地的年径流一直存在较强的减少趋势,其中黑河流域减小趋势较白河流域明显<sup>[23]</sup>。而黑河径流量年内分配又十分不均匀,年内变化曲线呈现双峰型<sup>[24]</sup>。这些研究均表明随着若尔盖湿地水文条件的变化,黑河与白河流域的生态环境均受

到了不同程度影响。而不同退化程度若尔盖湿地的土壤水分含量分布存在显著差异,在轻度和中度退化湿地中,土壤含水量在根系生长层(0~20 cm)与土壤深度呈正相关关系,在泥炭层(20~65 cm)与土壤深度呈负相关关系,在砂砾层(65 cm以下)又与土壤深度呈正相关关系;在严重退化湿地中土壤含水量主要受地下水影响,其会随土壤深度增加而持续增加<sup>[8]</sup>。可见,若尔盖湿地土壤水分含量降低的主要原因是植被根系蓄水功能被降低或消除,从而影响了土壤上层的含水量。

在其他研究方面,姜焯等<sup>[25]</sup>对若尔盖湿地近20年水土流失变化状况进行评估与分析,发现若尔盖湿地土壤水力侵蚀面积广,但是程度轻,说明水土流失不是这一地区主要的生态问题。

**3.2 土壤** 若尔盖高原湿地主要的土壤类型有泥炭土、沼泽土、草甸土和风沙土4种类型,而高原褐土、生草冲积土等其他类型土壤在该地区也有少量分布<sup>[1]</sup>。最近几年对若尔盖土壤方面的研究主要集中在土壤有机碳、矿物元素以及湿地退化对土壤理化性质的影响等方面。

湿地是重要的碳库,湿地土壤存储的碳占陆地土壤碳的10%~30%<sup>[26]</sup>。若尔盖高原湿地有机碳储量非常丰富,其土壤中泥炭层较厚,一般为3 m,最厚达10 m,泥炭分解度低,有机质含量>50%。水分和温度作为环境因子的重要组成部分,其在土壤有机碳的输入与分解过程中起主要作用<sup>[27]</sup>。在持续的水分饱和条件下,泥炭土的可溶性有机碳含量最高并且对凋落物添加的响应更为迅速<sup>[28]</sup>。而在不同水分条件下,若尔盖嵩草草甸浅土层中的有机碳含量存在明显差异,常年积水区的有机碳含量最高,季节性积水区次之,无积水区最低<sup>[29]</sup>。温度对土壤有机碳的影响主要体现在增温会显著促进湿地和草甸有机碳的矿化进程,从而降低土壤中有机碳的含量<sup>[30]</sup>。

若尔盖高原湿地保护区地处我国著名的低硒带上,土壤中硒含量严重低于动物所需的临界值是困扰当地牧民的主要问题之一。若尔盖地区天然土壤剖面样品中硒的质量分数为0.06~0.16 μg/g,明显低于世界和我国土壤硒含量的平均水平,其中区内风沙土属于极低硒土,草甸土和沼泽土平均值处于低硒与极低硒的边界,无土壤样品属于高硒土壤<sup>[31]</sup>。除地质背景和土壤母质是影响土壤硒含量的主要因素之外,土壤中有机质含量的变化也是影响土壤剖面中硒含量及其分布规律的重要因素<sup>[32-33]</sup>。

湿地退化对土壤理化性质的影响主要体现在土壤有机质及有效性氮、磷、钾含量呈明显下降趋势,土壤粘粒、粉砂粒含量不断降低,沙粒含量不断升高,土壤的持水和保水能力下降等方面。轻度放牧区土壤有机质和全氮的含量高于中度和强度放牧区,土层有机质和全氮含量随放牧强度增加呈明显下降趋势<sup>[34]</sup>。青焯等<sup>[35]</sup>的研究表明,鼠类洞穴密度与碳磷比、全磷具有极显著的正相关关系。在退化湿地中,人类和动物的活动对土壤理化性质具有直接且强烈的影响。

**3.3 气候** 若尔盖地区多属大陆性季风高原气候,气候严寒,四季不明,冬长无夏,年平均气温 0.7℃,无绝对无霜期,年均降雨量 656.8 mm,年均相对湿度 69%,年均日照时数 2 389 h。

气候变化对于该地区植被类型、泥炭沼泽的形成和发育起到了重要作用。而从全球气候变暖这一大的趋势来看,若尔盖高原湿地的气候也受到了显著影响。何奕忻等<sup>[36]</sup>利用多年来的文献记载和自然证据对若尔盖高原湿地气候变化进行重建,结果表明虽然这一区域 3 000 年前至今为气候干冷期,但是近 1 000 年来气温呈缓慢回升趋势。而其他研究也佐证了这一趋势,如肖国杰等<sup>[37]</sup>利用 1957—2011 年若尔盖气象观测站的逐日气温资料发现这一地区近 55 年稳定通过 0℃持续日数和年活动积温呈明显增加趋势;扎兴初等<sup>[38]</sup>的研究表明,1971—2011 年若尔盖地区的降雪逐步减少;廖捷<sup>[39]</sup>的研究表明,近 30 年内若尔盖高寒湿地的干湿变化趋势较小。

全球气候变暖主要是由于大气中二氧化碳和甲烷等温室气体大幅度增加造成的<sup>[40-41]</sup>。而高原湿地因其独特的物理化学条件而具有“碳汇”的功能,在二氧化碳、甲烷等温室气体的固定与释放中起着重要的“开关”作用,对全球气候变化具有重要意义。许多研究表明高原湿地生态系统的退化增加了二氧化碳的排放,加剧了温室效应<sup>[42-43]</sup>,而放牧管理对湿地二氧化碳和甲烷排放通量的影响研究仍未取得一致的结论<sup>[44]</sup>。适宜的湿度条件下,温度的增加通常导致湿地二氧化碳排放量的增加<sup>[45]</sup>,而温室气体的增加又会使气温进一步升高,所以控制好若尔盖湿地温室气体排放这一“开关”对研究区域乃至全球气候变化具有重要意义。

#### 4 湿地退化研究

根据张晓云等<sup>[46]</sup>对若尔盖高原湿地生态系统生态价值的估算,1975—2006 年若尔盖高原湿地生态系统的物质产品价值增加了 3 120 亿元,而气体调节和蓄水价值共减少了 75 107 亿元,说明合理利用湿地所带来的价值远不及其生态功能损失的价值。湿地退化的原因及机制一直以来都是湿地研究的热点,不同的学者利用自己的资料和工具多角度地分析了若尔盖湿地退化的程度,也相应地提出了一些治理措施。

近年来越来越多的学者基于遥感图像在时空尺度上分析了若尔盖湿地退化的趋势。邹孝等<sup>[47]</sup>的研究表明,若尔盖高原 1998—2008 年这 10 年来的 NDVI 变化趋势以衰减为主导;黄茜等<sup>[48]</sup>利用近 20 年来的遥感影像数据对若尔盖高原湿地景观格局变化进行分析,结果表明若尔盖高原湿地景观斑块数总体减少,湿地景观多样性呈均衡化发展,各斑块类型面积差异较大,分布不均匀,景观格局趋于破碎化。而更多的研究结果均显示近 20 年来若尔盖高覆盖度草地和沼泽面积在减少,低覆盖度草地、居民建设用地、沙地与未利用土地面积呈现持续增加的趋势,并且在保护区建立(1994 年)之后这种趋势并未得到遏制<sup>[49-52]</sup>。从景观尺度上看,若尔盖湿地逐年退化的趋势比较明显。若尔盖湿地退化的原因一直以来都是研究热点,究竟是自然气候变化还是人为干扰活动为主导因素一直存在争议。其中,越来越多的研究结果表明气候变暖

以及降雨减少对沼泽萎缩影响相当有限,人工挖沟排水作为强烈的人类活动干扰是若尔盖沼泽快速萎缩的直接原因<sup>[53]</sup>。

#### 5 研究展望

近年来若尔盖湿地研究成果较之前有了明显的倾向性,大部分研究都是结合湿地退化这一大的趋势来开展的。而对于湿地退化的规模和程度,越来越多的学者侧重于利用更加多样化和现代化的方法来进行分析和研究。尽管如此,若尔盖高原湿地的研究在一些方面仍需深入发展。

**5.1 高原湿地与全球气候变化之间关系的深入研究** 虽然许多研究均已表明全球气候变化促使若尔盖湿地退化,但是高原湿地作为温室气体固定与释放的“开关”,其在全球气候变化中贡献率的研究还是不够深入。更多的研究只是从一个侧面强调两者间的因果关系,而并没有宏观地将两者联系起来。对于像“高原湿地退化—温室气体排放量增加—全球气候变暖—高寒湿地退化”这样的恶性循环是否不可避免、人们应该从哪些方面控制好湿地的这个“开关”等问题均需进一步研究。另一方面,人类活动(如过度放牧和挖沟排水等)是若尔盖高原湿地退化的主要因素,其对湿地温室气体排放量的影响还未取得一致性的结论,这就进一步制约了高原湿地对全球气候变化响应机制的研究。

**5.2 高原湿地生态恢复技术的深入研究** 尽管近些年来对于若尔盖湿地退化的主要原因有了比较明确的答案,但是对于其退化机制还不完全清楚,主要体现在对湿地不同生态过程之间联系的研究不够深入。而湿地的恢复是一项长期而又系统化的工程,其涉及生态系统研究的各个方面,如生物多样性变化、生物地球化学循环、生态系统结构与功能等。这些均需要我们对湿地进行长期监测和多学科的综合研究,尤其应建立健全的高原湿地生态安全评价指标体系和方法,统一并规范高原湿地生态服务价值的评估标准。

**5.3 高原湿地可持续利用的深入研究** 若尔盖高原湿地资源丰富,但人类干扰活动又极为频繁,保护管理难度很大。在保护现有湿地不再被进一步破坏的同时,还需要可持续地利用这一丰富的资源来促进当地社会经济的健康、稳定和可持续发展。这不仅需要建立一套高原湿地生态恢复研究方法和技术体系,而且更需要建立一个完善而有效的管理系统,为高原湿地保护与可持续利用提供决策依据。同时还需要加强当地环境保护的宣传,提升当地群众的环境保护意识,尤其是需要获得当地少数民族的理解与支持,只有将理论联系实际才能更好地保护和合理利用高原湿地这一珍贵的资源。

#### 参考文献

- [1] 费世民,崔丽娟,何亚平,等. 若尔盖高寒湿地生态系统定位站的背景研究:若尔盖高寒湿地研究概述[J]. 四川林业科技,2006,27(2): 21-29.
- [2] 田应兵,熊明标,宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J]. 生态学杂志,2005,24(1):21-25.
- [3] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. 湿地科学,2007,5(1):64-68.
- [4] SHAW S P, FREDINE C G. Wetlands of the United States, their extent, and their value for waterfowl and other wildlife[M]. Washington, D. C.: U. S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, 1956:67.
- [5] 陈志科,吕宪国. 两个时期若尔盖高原沼泽湿地景观格局的对比研究

- [J]. 湿地科学, 2010, 8(1): 8-14.
- [6] 张继平, 张锺铨, 刘峰贵, 等. 长江源区当曲流域高寒湿地类型划分及分布研究[J]. 湿地科学, 2011, 9(3): 218-226.
- [7] 李玉凤, 刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(1): 102-108.
- [8] 李玫, 曾永刚, 高珊. 不同退化湿地土壤含水量纵向变化分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 76-78.
- [9] 周华茂, 曾良修, 喻歌农, 等. 川西北高原湿地资源现状及合理利用[J]. 西南农业学报, 1999, 12(51): 69-74.
- [10] 刘海, 张军. 西部湿地资源现状、问题及可持续发展研究: 以四川省若尔盖高原湿地为例[J]. 四川环境, 2001, 20(4): 47-50.
- [11] 干友民, 罗元佳, 周家福, 等. 川西北沙化草地生态恢复工程对沙地植被群落的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(6): 51-56.
- [12] 王乾, 罗鹏, 吴宁, 等. 道路对若尔盖高寒草地植被的影响研究[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(3): 54-61.
- [13] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [14] 林春英, 李希来, 金惠瑛, 等. 黄河上游河曲地区湿地植物多样性及其湿地退化的气候背景分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 348-356.
- [15] 崔丽娟, 马琼芳, 郝云庆, 等. 若尔盖高寒沼泽植物群落与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1749-1756.
- [16] 宁龙梅, 王华静. 若尔盖高原湿地研究 10 年回顾与展望[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(26): 14552-14554.
- [17] 吴鹏飞, 杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [18] 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 等. 青藏边缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4385-4397.
- [19] 张洪芝, 吴鹏飞, 崔丽娟. 高寒草甸大型土壤动物群落结构特征及其与环境的关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1267-1273.
- [20] 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽娟, 等. 大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 786-799.
- [21] 张国钢, 戴强, 刘冬平, 等. 若尔盖湿地水鸟资源季节变化[J]. 动物学杂志, 2013, 48(5): 742-749.
- [22] 窠亮, 李华, 李凤山, 等. 四川若尔盖湿地国家级自然保护区繁殖期黑颈鹤调查[J]. 四川动物, 2013, 32(5): 770-773.
- [23] 李金晶, 任小凤, 董莹莹. 若尔盖湿地年径流序列趋势识别研究[J]. 水利规划与设计, 2014(7): 50-52.
- [24] 周泽江, 覃光华, 于春平, 等. 若尔盖湿地黑河径流分析及预测[J]. 水电与新能源, 2013(3): 18-22.
- [25] 姜辉, 孙建国, 谢家丽, 等. 近 20a 若尔盖湿地水土流失变化的遥感评估[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1088-1093.
- [26] SMITH L C, MACDONALD G M, VELICHKO A A, et al. Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early holocene[J]. Science, 2004, 303(5656): 353-356.
- [27] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [28] 张雪雯, 莫熠, 张博雅, 等. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 134-140.
- [29] 蔡倩倩, 郭志华, 胡启鹏, 等. 若尔盖高寒嵩草草甸湿地不同水分条件下土壤有机碳的垂直分布[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 9-16.
- [30] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [31] 朱晓华, 刘尧端, 刘久臣, 等. 川西高原天然剖面土壤硒的含量及分布特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 673-682.
- [32] 辛国省, 龙瑞军, 尚占环, 等. 青藏高原东北缘放牧草地土壤矿物元素含量及分布特征[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 8-17.
- [33] 张璐, 陈杜军, 阿米基, 等. 若尔盖地区硒土壤地球化学特征[J]. 矿物学报, 2013(52): 280-281.
- [34] 李霞. 放牧干扰对若尔盖高原湿地土壤性质的影响[J]. 农业与技术, 2015, 35(5): 44-46.
- [35] 青焯, 孙飞达, 李勇, 等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 38-47.
- [36] 何奕忻, 吴宁, 朱求安, 等. 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1615-1625.
- [37] 肖国杰, 蒋琰, 张红玲. 若尔盖近 55 年热量资源分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(22): 69-73.
- [38] 扎兴初, 黄待富, 郭懋, 等. 若尔盖高原草原湿地 40 年积雪的初步研究[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(4): 61-64.
- [39] 廖捷. 基于 Z 指数的若尔盖湿地干湿变化研究[J]. 长春师范学院学报, 2013, 32(1): 83-86.
- [40] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [41] WANG X Y, HUANG D, ZHANG Y J, et al. Dynamic changes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from grazing sheep urine and dung patches in typical steppe[J]. Atmospheric environment, 2013, 79: 576-581.
- [42] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 120-128.
- [43] 王长科, 吕宪国, 周华荣, 等. 若尔盖高原沼泽土壤氧化甲烷的研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 646-649.
- [44] 周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 等. 围栏禁牧与放牧对若尔盖高原泥炭地 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 183-189.
- [45] 王爱东, 尚占环, 鱼小军, 等. 东祁连山北坡高寒灌丛草地围栏与放牧干扰下 CO<sub>2</sub> 释放速率的比较研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(1): 120-124.
- [46] 张晓云, 吕宪国, 沈松平. 若尔盖高原湿地生态系统服务价值动态[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1147-1152.
- [47] 邹孝, 郭燕, 谭钦文, 等. 1998-2008 年川西北若尔盖高原 NDVI 变化趋势分析[J]. 四川环境, 2013, 32(S1): 55-59.
- [48] 黄茜, 蓝岚, 杨武年, 等. 若尔盖高寒湿地景观格局变化分析[J]. 四川林业科技, 2014, 35(6): 60-63.
- [49] 谢家丽, 宋翔, 颜长珍. 人类干扰对若尔盖高原景观格局变化影响的遥感分析[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 16-20.
- [50] 贾虎军, 杨武年. 若尔盖国家级自然保护区湿地变化模拟[J]. 地理空间信息, 2014, 12(1): 104-107.
- [51] 王长虎, 孙存举. 基于 3S 技术的若尔盖湿地保护区土地利用变化研究[J]. 四川林勘设计, 2014(3): 20-23.
- [52] 王文丽, 董治宝, 颜长珍. 基于景观结构方法的若尔盖高原土地退化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 117-122.
- [53] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 172-180.

(上接第 30 页)

偏差(RSD)。经测定,标准偏差为 6.259 4, RSD 为 0.78%。

**2.2 检出限** 检出限由下式求得:  $DL = 3SD/K$ 。式中, SD 为标准偏差, 即连续 11 次(第 1 个测定数据要经过 4 次测定)测定空白溶液的荧光信号的标准偏差; K 为工作曲线的斜率,  $K = IF/C$ , IF 为对应标准溶液的荧光信号值。经测定, 检出限为 0.005 2  $\mu\text{g/L}$ 。

### 3 小结

《水质 汞、砷、硒、铍和锑的测定 原子荧光法》(HJ 694—2014)要求硒的 DL 小于 0.400 0  $\mu\text{g/L}$ , RSD 小于 1.00%。经测定, 硒的 DL 为 0.005 2  $\mu\text{g/L}$ , RSD 为 0.78%, 满足要求。

检出限不仅与仪器的灵敏度有关, 还与仪器的稳定性有关, 因此提高仪器的灵敏度, 降低噪声是降低检出限及提高信噪比的有效方法。此外, 检出限与水的纯度、酸的纯度、硼氢化钾溶液的浓度、玻璃器皿的清洁程度等有关。精密度与硼氢化钾溶液中氢氧化钠的浓度有关, 同时硼氢化钾溶液应现用现配, 避免阳光照射, 以保证溶液的稳定性。

### 参考文献

- [1] 刘斌. 氢化物发生-原子荧光光谱法的研究进展[J]. 化工技术与开发, 2012, 41(5): 18-22.
- [2] 杨秀琳. 原子荧光光谱法测定水中的痕量砷、硒、汞[J]. 化学分析计量, 2004, 13(1): 32-34.
- [3] 张锦茂, 梁敬, 董方. 中国 30 多年来原子荧光光谱仪器的发展与应用[J]. 中国无机分析化学, 2013, 3(4): 1-10.