

若尔盖湿地土壤特性空间变化研究

赵娜娜^{1,2}, 宁宇¹, 马骅¹, 李肖夏¹, 王义飞¹

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091;
2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 若尔盖湿地是青藏高原高寒湿地生态系统的典型代表, 近年来湿地急剧萎缩和退化。根据若尔盖湿地分布特点, 采用野外调查和室内试验分析相结合的方式, 对在6个样区采取的349个土壤样品进行测试分析, 研究若尔盖湿地土壤质地、土壤水分、养分空间特性变化, 探讨湿地生态系统演化对土壤状况的影响。研究结果表明: 若尔盖湿地土壤质地变化在空间和垂向上差异较小, 花湖地区主要为壤土, 纳若桥、达水曲、排水沟、哈丘湖为砂壤土, 喜马拉雅地区则为壤砂土。土壤pH值的变异系数最小, 空间变异性相对较弱, 有机质的变异系数相对较大, 其次为速效磷和速效钾; 有机质从表层到80 cm处呈降低趋势, 有机质含量花湖 > 纳若桥 > 排水沟 > 哈丘湖 > 达水曲 > 喜马拉雅。不同区域的土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型参数差异显著, 喜马拉雅和达水曲区域的A和n值明显高于其余区域, 土壤水分持水性能较弱。研究结合不同区域的土壤性质、水分及养分特性变化, 对若尔盖未来湿地保护和管理的重点方向和区域进行指导和建议。

关键词: 土壤质地; 土壤水分特征曲线; 土壤养分; 空间变化; 若尔盖湿地

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)01-0232-09

Study on the spatial variation of soil characteristics in Zoige wetland

ZHAO Nana^{1,2}, NING Yu¹, MA Hua¹, LI Xiaoxia¹, WANG Yifei¹

(1. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: As a typical representative of the Qinghai-Tibet Plateau Alpine wetland ecosystem, Zoige wetland has undergone sharp contraction and degradation in recent years. Based on the characteristics of Zoige wetland, in order to understand the changes of soil texture, soil moisture, and nutrient of the wetland, 349 soil samples were taken and analyzed from six sample areas by combining field investigation and laboratory analysis to explore the impact of wetland ecosystem evolution on soil conditions. Results showed that the differences of soil texture change in space and vertical were small. The soil texture is loam for Huahu, sandy loam for Naruoqiao, Dashuiqu, Drainage area and Haqiuhu area, but loamy sand for Ximalaye area. The variation coefficient of pH value was the smallest, and the spatial variability was relatively weak. The coefficient of variation of organic matter was relatively large, followed by available phosphorus and available potassium. The organic matter decreased from the surface to 80cm, and the organic matter content for the six areas follows the order as Huahu > Naruoqiao > Drainage area > Haqiuhu > Dashuiqu > Ximalaye. The parameters of the soil water characteristic curve of different regions were significantly different in the Van Genuchten model. Parameter A and n in the Ximalaye and Dashuiqu area, where the soil water retention was lower, were significantly higher than the other areas. In this paper,

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-09-14

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFINT2015K06); 国家自然科学基金项目(51609243); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-201612p)

作者简介: 赵娜娜(1985-), 女, 河南灵宝人, 博士, 助理研究员, 研究方向为水文及水资源, 湿地生态水文学。

通讯作者: 王义飞(1973-), 男, 吉林扶余人, 博士, 副研究员, 研究方向为生态学。

based on the changes in soil properties, water and nutrient characteristics in different regions, some suggestions on Zoige wetland protection and management in different areas were also proposed to control soil desertification and improve the capacity of retaining water of wetland.

Key words: soil texture; soil water retention curve; soil nutrient; spatial variation; Zoige wetland

1 研究背景

若尔盖湿地位于青藏高原的东北部,区域内沼泽遍布,是世界上最大的高原泥炭沼泽集中分布区,若尔盖湿地作为青藏高原高寒湿地生态系统的典型代表^[1-3],已被列为国家级湿地自然保护区和国家级生态功能保护区。同时,若尔盖湿地由于其特殊的地理位置,也是黄河河源的重要补给区,是黄河上游最重要的水源涵养区和生态功能保护区,对黄河上游的生态环境保护和流域水资源可持续发展等有着重要的作用和影响^[4-5]。但是,根据研究和调查发现,若尔盖湿地自 1960 年以来,沼泽出现明显的萎缩,地表水减少,地下水下降严重,沼泽面积严重退化,面积萎缩达到 52%^[6]。人工开渠作为强烈的人类活动干扰,可能是导致若尔盖沼泽快速萎缩的重要原因之一^[2,6-7]。此外,若尔盖湿地沼泽的严重退化也伴随着草地退化、土壤沙化等一系列生态环境问题,湿地景观面积呈萎缩状态,并且呈现出高度的异质性^[8-11]。从 1975 年到 2005 年的 30 年间,若尔盖湿地的土壤沙漠化以年均 70.18 km² 的速度逐年增加^[12]。

若尔盖湿地的急剧萎缩和退化引起了国内外学者的高度关注和研究,近年来随着若尔盖国家级湿地自然保护区的建立,开始对区域内的湿地生态环境和系统实施保护和恢复,推行了一系列的轮牧禁牧、填埋沟渠、治沙种草等恢复措施,但是湖沼水面积仍在退缩,退化沼泽、草甸类的草场面积持续增加,沙地显著增加^[13-15]。若尔盖湿地和草地的退化导致区域生态系统服务价值减少,湿地土壤涵养水源的服务功能下降^[16]。这种土地覆盖方式的变化可能使得湿地土壤特性发生变化,本研究即以若尔盖湿地自然保护区为主要研究区域,在保护区不同区域内进行采样布设,分析研究区域湿地土壤的水分和养分变化,为若尔盖湿地生态环境保护和恢复提供科学依据和支撑。

2 研究区域与方法

2.1 自然概况

若尔盖高原湿地位于青藏高原的东北隅,是青

藏高原湿地的典型代表,也是世界上海拔最高、面积最大的高原泥炭沼泽的主要分布区之一,平均海拔 3 500 m,沼泽总面积约 49 0250 hm²,隶属四川省若尔盖县、红原县和阿坝县以及甘肃省的玛曲县和碌曲县^[3]。若尔盖高原湿地为起伏平缓的丘状高原区,主要地貌类型有低山、丘陵、阶地、河漫滩、宽谷和湖群洼地等^[17]。湿地内的主要河流为黄河及其支流黑河和白河,同时由于黄河和支流的改道,区域内小河流和湖泊星罗棋布,主要的湖泊有哈丘湖、错那坚湖和花湖(见图 1)。

研究区域的气候为大陆性高原气候,寒冷湿润,霜冻期长,日温差大。研究区多年平均气温在 1 ℃左右,年日照时数约 25 000 h,全年降水量约 600 ~ 800 mm,雨季主要分布在 5 - 10 月,约占全年降水量的 90%,霜冻期约 20 d^[18]。区内植物以沼泽植被和草甸植被为主,优势种有木里苔草(*Carex muliensis*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)和藏蒿草(*Kobresia tibetica*)等^[19]。

区内成土母质以三叠系的板岩、砂岩、白云岩、泥灰岩构成的残积、坡积物和第四系的冲积、洪积、湖积物为主,且依不同地形有规律分布。在平坝沼泽区主要为第四系沼泽有机质松散堆积物、河流冲积物、小溪洪积物、湖泊沉积物和风积物(沙),丘原(草甸)区则主要为三叠系的板岩、砂岩和粉砂岩的堆积、残积物。主要土壤类型及分布规律为:平坝沼泽区为泥炭土和沼泽土,丘原草甸区为草甸土,古河床和河流附近的风积母质上常发育为风沙土^[19]。

2.2 实验材料与方法

为了获取当前若尔盖湿地的土壤特性,土壤样品的采集于 2016 年 8 月开始。土壤采样点的布设原则是:根据若尔盖湿地自然保护区内湿地退化、土壤沙化情况,同时结合自然保护区实际情况,在自然保护区的试验区选择 6 个主要监测区域(见表 1),并在这 6 块监测区域内选择典型地段总共设置 19 个固定监测样地(见图 1、表 1)。将每块监测样地均匀划分网格,每个网格编上号码,随机获得 3 个数字,每个数字所对应的网格号即为采样点。采样区域及样地的选取具有一定的代表性,能够满足或者反映该区域的主要特性和问题,有助于对若尔盖湿

地植被、土壤、水文等基础要素的长期监测工作和实验的开展。

为了获取监测区域土壤容重以及水分特性,采用土钻和标准环刀分别在每个采样点的0~5,5~20,20~35,35~50,50~65以及65~80 cm深度采取土样,共采集土壤样品合计349个,称取湿重后密封送往实验室进行土壤样品测试分析。

主要的测试指标包括:有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、pH值、电导率、容重和土壤水分特征曲线。其中,土壤有机质采用重铬酸钾容量法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾用 NH_4Ac 浸提法测定,pH用电位法(土水比为5:1),电导率用电导率仪(土水比为5:1)测定,土壤水分特征曲线采用离心机测定。

表1 若尔盖湿地自然保护区监测区域及样地布设

编号	名称	样地数量	样地大小	区域特性
1	达水曲	3	100m×100m	若尔盖湿地黑河的重要支流,监测区域布设有测流堰,河流两岸放牧活动较多,植被覆盖度一般,有不同程度的沙化
2	花湖	3	200m×200m	湿地重点监测区域,旅游景点,人为干扰性大,大面积草甸区域,有部分沼泽区域
3	哈丘湖	2	100m×100m	湿地重点监测区域,水域面积大,人为干扰相对较少,植被良好,大面积草甸区域
4	排水沟	5	100m×100m	若尔盖湿地比较大的一条排水沟,枯水期沟渠干涸,土壤裸露,周边湿地退化严重,植被覆盖度一般
5	喜马拉雅	3	100m×300m	植被严重退化,土壤沙化现象严重
6	纳若桥	3	100m×100m	沼泽区,人为干扰性很小,水域和植被保护很好

3 研究结果与讨论

3.1 湿地各区域土壤机械组成

若尔盖湿地各区域0~80 cm深度的土壤机械组成包括砂粒(2~0.02 mm)、粉粒含量(0.02~0.002 mm)以及黏粒(<0.002 mm)含量如图2所示。喜马拉雅地区的砂粒含量明显高于其他区域,其次为达水曲,纳若桥、哈丘湖和排水沟的砂粒含量相对较低,花湖地区的砂粒含量最小。相反,各土层的粉粒含量花湖和排水沟地区相对较高,黏粒含量各区域相对差异较小,喜马拉雅地区最低。每个地区的土壤质地垂向变化不大,若尔盖湿地各区域不同深度的土壤机械组成及土壤质地见表2。通过统计对比分析发现,各区域的不同采样点的砂粒、粉粒和黏粒含量在不同土壤深度间并没有显著差异。按照国际制土壤分类标准,若尔盖湿地花湖区域表层土壤略有沙化,为砂壤土,20 cm以下则为壤土,达水曲、纳若桥、哈丘湖地区0~80 cm的土壤质地在各深度相同,土壤粒径分布相对均匀,主要为砂壤土,排水沟区域表层土壤到65 cm深度主要为砂壤土,80 cm以下则为壤土,喜马拉雅地区则为壤砂土。这种不同地区土壤质地的差异有可能与近年来

人类活动的影响有关,20世纪50、60年代起,若尔盖大规模的湿地排水和放牧活动对湿地退化以及表层土壤沙化产生了明显的影响,大量沼泽湿地退化和萎缩影响了湿地景观格局,从而也会改变湿地土壤特性,如达水曲区域的土壤砂粒含量相对较高,草甸植被覆盖一般应该与其比较多的人类放牧活动影响有关。而排水沟区域是20世纪70年代初若尔盖湿地大规模疏干排水开挖的渠道,这种大规模的湿地排水活动改变了湿地水文周期,使湿地水位发生显著变化,导致湿地植被演替和生态系统发生变化,湿地的土壤特性也会随之发生变化^[10-11,13]。

3.2 湿地各区域土壤养分

本文选取有机质、碱解氮、速效磷、速效钾和pH值5个指标用来反映研究区的土壤肥力状况,所选肥力指标与区域内植物生长状况密切相关,将每个区域内采样点的数据进行简单统计分析,其统计值见表3。5个指标中,pH值的变异系数最小,其中纳若桥地区最小,达水曲和喜马拉雅地区最大;有机质的变异系数相对较大,其次为速效磷和速效钾,达水曲和喜马拉雅地区的碱解氮变异性远远弱于其余4个区域,可能与这两个区域内土壤有不同程度的沙化有关,土壤固氮性弱,土壤肥力低。

若尔盖湿地不同区域的土壤肥力垂向变化如图 3 所示,经过方差分析对比,不同区域各深度的有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等均通过显著性检验(F 检验,显著水平 $\alpha = 0.05$),并采用 LSD 方法进行多重比较,有机质多重比较结果见表 4。

由表 4 可看出,不同区域的有机质含量差别较大,达水曲和喜马拉雅也地区的有机质含量最低,且不同深度的变化和差异相对较小,其次为哈丘湖地区,而花湖区域的有机质含量最高,这可能主要与花湖区域内沼泽泥炭土发育较好,土壤肥力较高,而达水曲和喜马拉雅也区域的土壤沙化现象比较明显有关。总体上,各个区域的不同土层深度上的有机质从表层到 80 cm 处呈降低趋势,有机质含量花湖 > 纳若桥 > 排水沟 > 哈丘湖 > 达水曲 > 喜马拉雅也。这也说明了在湿地保护相对比较好的一些沼泽草甸区域如纳若桥和花湖地区,湿地土壤的有机质含量相对较高,而在湿地退化严重的区域喜马拉雅也地区土壤有机质含量相对较低。这与熊远清等^[20]的研究结

论基本一致。



图 1 若尔盖湿地自然保护区及土壤采样点布设

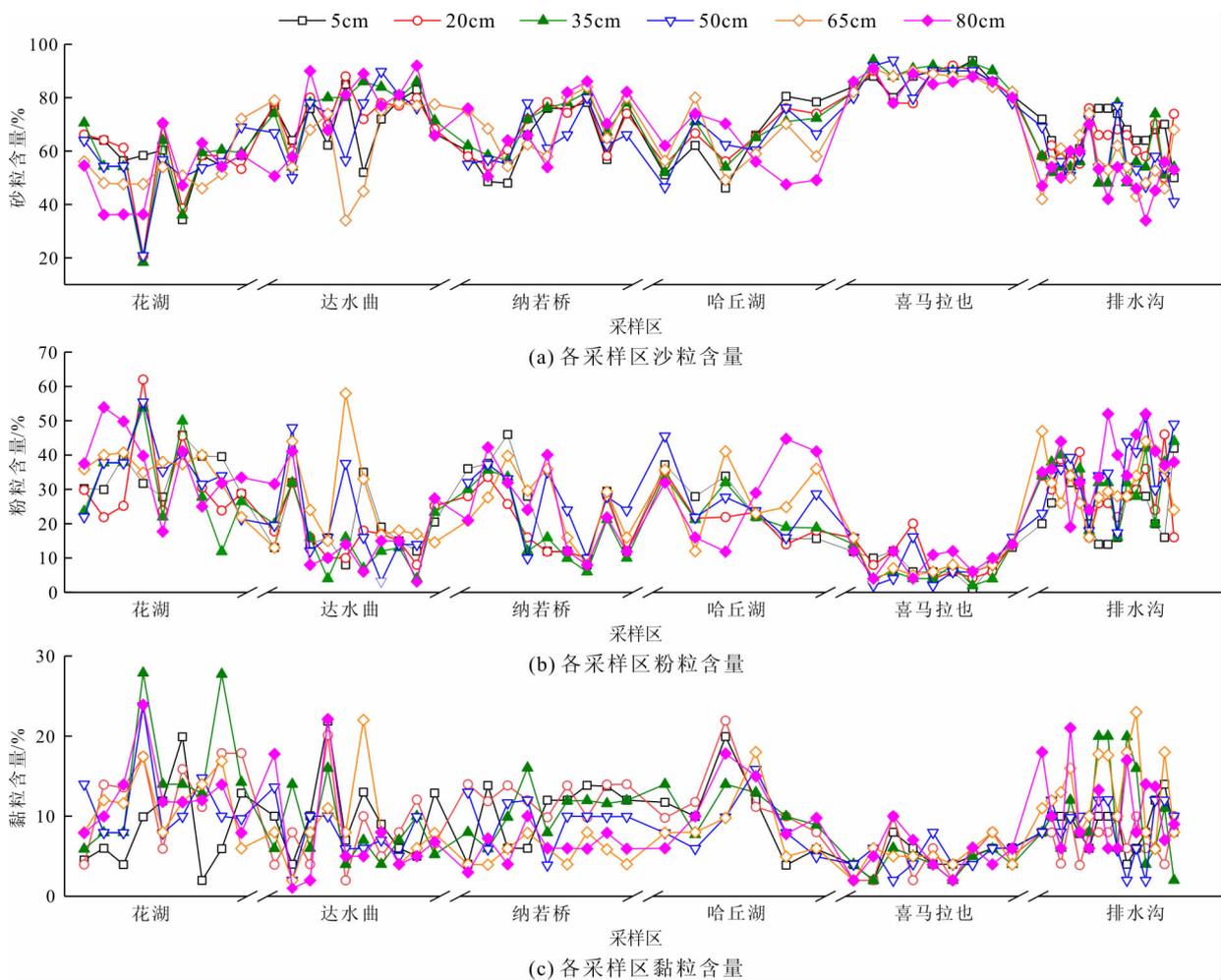


图 2 若尔盖湿地各监测区域 0~80 cm 深度土壤机械组成

表2 若尔盖湿地不同区域不同土层土壤机械组成及土壤质地分布

区域	土壤深度/cm	土壤机械组成			土壤质地
		砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	
花湖	5	56.67	34.78	8.55	砂壤土
	20	54.55	32.38	13.07	壤土
	35	52.95	32.33	14.72	壤土
	50	53.22	35.01	11.77	壤土
	65	52.65	35.61	11.74	壤土
	80	50.74	36.68	12.58	壤土
达水曲	5	71.68	18.44	9.88	砂壤土
	20	75.14	16.90	7.96	砂壤土
	35	77.36	14.72	7.92	砂壤土
	50	72.28	20.00	7.72	砂壤土
	65	66.18	25.33	8.49	砂壤土
	80	75.22	17.11	7.67	砂壤土
纳若桥	5	65.07	24.55	10.38	砂壤土
	20	67.79	19.64	12.57	砂壤土
	35	70.06	19.36	10.58	砂壤土
	50	64.51	25.90	9.59	砂壤土
	65	69.71	24.78	5.51	砂壤土
	80	70.12	23.65	6.23	砂壤土
哈丘湖	5	64.05	25.38	10.57	砂壤土
	20	65.55	22.35	12.10	砂壤土
	35	64.26	24.48	11.26	砂壤土
	50	64.03	27.22	8.75	砂壤土
	65	62.12	28.77	9.11	砂壤土
	80	59.84	29.10	11.06	砂壤土
喜马拉雅也	5	86.78	8.21	5.01	壤砂土
	20	85.28	10.02	4.70	壤砂土
	35	89.13	6.66	4.21	壤砂土
	50	86.67	8.45	4.88	壤砂土
	65	86.92	8.09	4.99	壤砂土
	80	85.45	9.44	5.11	壤砂土
排水沟	5	66.07	25.01	8.92	砂壤土
	20	62.85	29.82	7.33	砂壤土
	35	57.29	32.25	10.46	砂壤土
	50	56.74	34.49	8.77	砂壤土
	65	55.38	31.54	13.08	砂壤土
	80	51.56	37.57	10.87	壤土

区域间碱解氮的空间变化差异相对较小(表3),花湖区域的含量最高,达水曲和喜马拉雅也区域的含氮量最小;垂向变化上,35 cm深度以下的土壤碱解氮的变化较小。不同区域的速效磷和速效钾的变化与

碱解氮类似,花湖、纳若桥和排水沟地区相对较高,达水曲和喜马拉雅也区域相对较低,基本上沿垂向逐渐减少。若尔盖湿地 pH 值相对比较稳定,处于 6.59 ~ 7.71 之间,为中性到弱碱性(达水曲地区 pH = 7.71)。

3.3 湿地土壤水分特性

3.3.1 不同区域土壤水分特性参数 在每个采样区内随机选取 3 个采样点进行土壤水分特性测试,土壤水分特征曲线采用离心机法测定,将环刀内饱和和土样放置于高速恒温离心机内,设定不同转速,达到平衡稳定后采用高精度天平测量其体积含水率。将测试的不同转速下的体积含水率数据进行方差分析和多重比较发现,每个区域内不同深度间的体积含水率没有显著差异,因此,将各区域 3 个重复采样点数据进行统计平均作为该区域土壤水分特性值,每个区域的饱和含水率、田间持水量以及凋萎系数详见表 5。

由表 5 可看出,饱和含水率差异较为明显,纳若桥、排水沟和喜马拉雅也地区的饱和含水率与达水曲、花湖和哈丘湖相比有显著差异,达水曲、花湖和哈丘湖之间并没有明显差异。排水沟、喜马拉雅也地区的田间持水量与其它区域相比有显著差异,排水沟的田间持水量最高(0.35 cm³/cm³),喜马拉雅也则仅为 0.09 cm³/cm³;而纳若桥和达水曲、花湖和哈丘湖之间并无明显差异。不同区域间凋萎系数的差异与田间持水量相同,排水沟和喜马拉雅也地区的差异与其余地区比较显著,哈丘湖和花湖、纳若桥区域的凋萎系数并无显著差异。纳若桥、哈丘湖等植被覆盖良好的区域土壤容重相对较低,而达水曲和喜马拉雅也地区植被覆盖度一般、土壤沙化明显的区域则土壤容重明显增大,说明湿地退化和沙化有可能改变土壤容重分布和变化。

3.3.2 不同区域土壤水分特征曲线参数比较 若尔盖湿地不同区域的实测土壤水分特征曲线如图 4。描述土壤水分特征曲线的模型比较多,其中 Van Genuchten 模型(公式 1)因为适用性广,模拟效果好得到广泛应用^[21-25]。

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (A \cdot h)^n]^{(1-\frac{1}{n})}} \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤体积含水率, cm³/cm³; θ_r 和 θ_s 分别为土壤剩余和饱和含水率, cm³/cm³; h 为压力水头, cm; A (cm⁻¹) 和 n 为曲线形状参数。为适用于目前土壤水分测定方法和习惯,本文模拟中将压力水头用土壤水吸力代替。

表 3 土壤肥力指标描述性统计特征

样地	统计值	有机质/(g · kg ⁻¹)	碱解氮/(mg · kg ⁻¹)	速效磷/(mg · kg ⁻¹)	速效钾/(mg · kg ⁻¹)	pH 值
花湖	标准差	192.44	91.46	23.50	144.53	0.40
	均值	293.60	220.48	40.31	396.88	7.42
	变异系数	0.66	0.41	0.58	0.36	0.05
达水曲	标准差	11.17	8.12	14.87	66.37	0.68
	均值	20.58	138.93	21.76	178.23	7.71
	变异系数	0.54	0.06	0.68	0.37	0.09
纳若乔	标准差	142.85	85.81	17.13	120.69	0.22
	均值	282.73	200.20	38.33	367.13	6.59
	变异系数	0.51	0.43	0.45	0.33	0.03
哈丘湖	标准差	99.65	40.16	15.23	73.09	0.60
	均值	121.30	140.04	25.68	318.88	7.60
	变异系数	0.82	0.29	0.59	0.23	0.08
喜马拉雅	标准差	8.91	2.46	8.63	62.05	0.65
	均值	11.41	134.12	17.33	115.04	7.12
	变异系数	0.78	0.02	0.50	0.54	0.09
排水沟	标准差	158.39	75.62	16.59	165.75	0.31
	均值	238.46	187.39	42.37	403.89	7.23
	变异系数	0.66	0.40	0.39	0.41	0.04

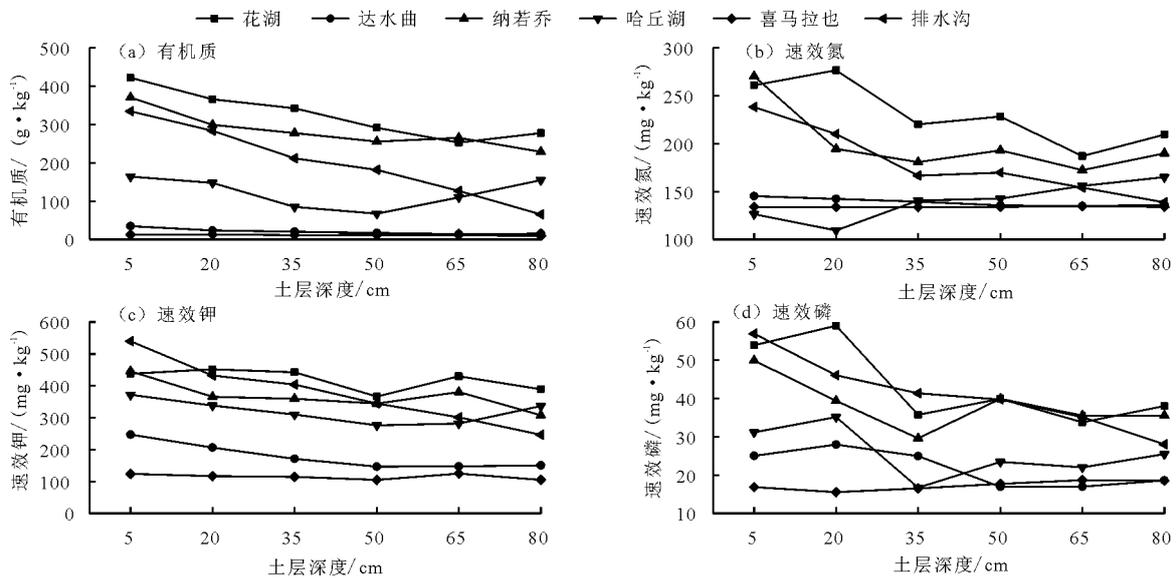


图 3 若尔盖湿地不同地区土壤剖面有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分布

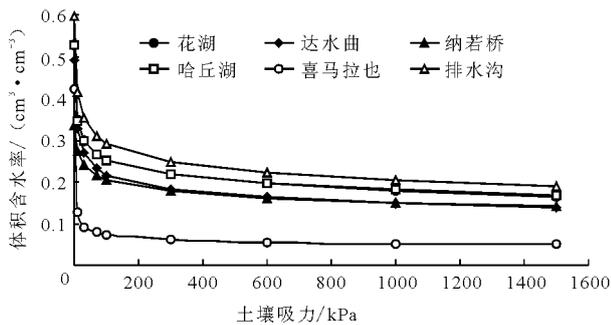


图 4 湿地不同区域实测土壤水分特征曲线

为了更好地描述研究区域的土壤水分特征曲线,本文采用 Van Genuchten 模型来拟合若尔盖湿地土壤水分特征曲线,并与实测结果对比,模拟效果较好。模型参数率定结果见表 6。通过方差分析,模拟结果显著水平较高,相关系数达到 0.99, Van Genuchten 模型可以用于很好地描述若尔盖湿地不同区域的土壤水分特征曲线,表征土壤水分特性参数。模型拟合的参数不同区域的饱和含水率 θ_s 与实测值(见表 5)基本一致,同时将剩余含水量作为

一个参数进行拟合,纳若桥和哈丘湖剩余含水量基本一致,喜马拉雅和花湖地区的剩余含水量略高,排水沟地区最低。模型参数 A 和 n 则会直接影响土壤

水分特征曲线的几何形态,一般情况下,其他参数不变时, A 值越小,曲线的中间平缓部分相对越高,也即相同含水率情况下对应的土壤吸力越大。

表4 若尔盖湿地不同区域不同深度土壤的有机质多重比较结果

区域	土壤深度/cm						
	5	20	35	50	65	80	
达水曲	哈丘湖	-129.2372*	-124.3678*	-64.7617	-50.2378	-95.9078	-139.7917*
	花湖	-347.2178*	-306.6033*	-287.9389*	-245.5222*	-214.7489*	-236.0844*
	纳若桥	-335.6689*	-275.9300*	-257.5078*	-238.3778*	-251.7211*	-213.7233*
	排水沟	-300.3289*	-260.5998*	-192.0007*	-164.7198*	-113.3391*	-49.9513
	喜马拉雅也	22.1933	10.2811	8.8789	5.3611	2.5956	5.7311
哈丘湖	达水曲	129.2372*	124.3678*	64.7617	50.2378	95.9078	139.7917*
	花湖	-217.9806*	-182.2356*	-223.1772*	-195.2844*	-118.8411	-96.2928
	纳若桥	-206.4317*	-151.5622*	-192.7461*	-188.1400*	-155.8133*	-73.9317
	排水沟	-171.0917*	-136.2320*	-127.2390*	-114.4820*	-17.4313	89.8403
	喜马拉雅也	151.4306*	134.6489*	73.6406	55.5989	98.5033	145.5228*
花湖	达水曲	347.2178*	306.6033*	287.9389*	245.5222*	214.7489*	236.0844*
	哈丘湖	217.9806*	182.2356*	223.1772*	195.2844*	118.8411	96.2928
	纳若桥	11.5489	30.6733	30.4311	7.1444	-36.9722	22.3611
	排水沟	46.8889	46.0036	95.9382*	80.8024	101.4098	186.1331*
	喜马拉雅也	369.4111*	316.8844*	296.8178*	250.8833*	217.3444*	241.8156*
纳若桥	达水曲	335.6689*	275.9300*	257.5078*	238.3778*	251.7211*	213.7233*
	哈丘湖	206.4317*	151.5622*	192.7461*	188.1400*	155.8133*	73.9317
	花湖	-11.5489	-30.6733	-30.4311	-7.1444	36.9722	-22.3611
	排水沟	35.3400	15.3302	65.5071	73.6580	138.3820*	163.7720*
	喜马拉雅也	357.8622*	286.2111*	266.3867*	243.7389*	254.3167*	219.4544*
排水沟	达水曲	300.3289*	260.5998*	192.0007*	164.7198*	113.3391*	49.9513
	哈丘湖	171.0917*	136.2320*	127.2390*	114.4820*	17.4313	-89.8403
	花湖	-46.8889	-46.0036	-95.9382*	-80.8024	-101.4098	-186.1331*
	纳若桥	-35.3400	-15.3302	-65.5071	-73.6580	-138.3820*	-163.7720*
	喜马拉雅也	322.5222*	270.8809*	200.8796*	170.0809*	115.9347*	55.6824
喜马拉雅也	达水曲	-22.1933	-10.2811	-8.8789	-5.3611	-2.5956	-5.7311
	哈丘湖	-151.4306*	-134.6489*	-73.6406	-55.5989	-98.5033	-145.5228*
	花湖	-369.4111*	-316.8844*	-296.8178*	-250.8833*	-217.3444*	-241.8156*
	纳若桥	-357.8622*	-286.2111*	-266.3867*	-243.7389*	-254.3167*	-219.4544*
	排水沟	-322.5222*	-270.8809*	-200.8796*	-170.0809*	-115.9347*	-55.6824

注: * 表示显著差异,显著水平为0.05。

由图4实测土壤水分特征曲线可以看出,喜马拉雅也地区的土壤水分特征曲线平缓部分明显低于其他区域,由表6可以看出, A 值最大(2.343),这是由于喜马拉雅也地区草地退化、土壤沙化现象严重,土

壤持水能力明显降低造成的。参数 n 值则影响曲线的弯曲程度,决定曲线的坡度, n 越大曲线坡度越陡,喜马拉雅也地区的 n 值在1.45左右,使得其水分特征曲线的弯曲程度较大,其余5个区域的土壤水

分特征曲线基本接近,曲线形状参数的 n 值基本在 1.14 ~ 1.21 之间。这种不同区域间土壤水分特征曲线的差异可能与近些年来若尔盖湿地景观格局变化和土地利用覆盖变化有关,尤其是大规模的人工排水使得若尔盖湿地沼泽面积迅速减少,大部分沼泽演变为非湿地类型,很大程度上影响了湿地区域的土壤性质及水分特性^[8,19]。一些研究结果表明,若尔盖湿地退化过程中土壤持水功能呈显著下降趋

势,尤其表现在沙化草甸阶段湿地的土壤持水量,而喜马拉雅地区正处于沙化阶段,这可能就是该地区土壤水分特性的变化较大的主要原因。另一方面,土壤有机质含量可能通过改变土壤结构从而对土壤持水量有直接和间接影响,土壤持水量一般与有机质含量呈正相关。在若尔盖湿地沼泽和湖泊保护比较好的区域如花湖和纳若桥地区,其有机质含量相对较高,土壤持水量和水源涵养功能比较好^[20]。

表 5 若尔盖湿地不同区域土壤水分特性参数

水分特性参数	花湖	达水曲	纳若桥	哈丘湖	喜马拉雅	排水沟
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.52	1.21	0.59	0.52	1.40	0.71
饱和含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.53	0.49	0.39*	0.53	0.42*	0.60*
田间持水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.30	0.27	0.29	0.30	0.09*	0.35*
凋萎系数/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.17	0.14	0.16	0.17	0.05*	0.19*

注: * 表示与其它地区有显著差异,显著水平为 0.05。

表 6 湿地不同区域土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型参数率定结果

区域	θ_r	θ_s	A	n	R^2
花湖	0.050 ± 0.018	0.521 ± 0.003	0.450 ± 0.056	1.220 ± 0.022	0.9997
达水曲	0.036 ± 0.016	0.492 ± 0.002	0.803 ± 0.117	1.209 ± 0.020	0.9998
纳若桥	0.010 ± 0.035	0.334 ± 0.002	0.346 ± 0.065	1.144 ± 0.029	0.9993
哈丘湖	0.010 ± 0.038	0.527 ± 0.003	1.700 ± 0.452	1.148 ± 0.025	0.9996
喜马拉雅	0.044 ± 0.002	0.423 ± 0.002	2.343 ± 0.503	1.478 ± 0.035	0.9999
排水沟	0.001 ± 0.250	0.598 ± 0.017	1.104 ± 1.316	1.143 ± 0.125	0.9896

4 结论与建议

由于其独特的地理位置和气候,若尔盖高原湿地生态系统具有明显的特殊性和复杂性,而土壤作为湿地生态系统的基础,对湿地生态系统的维持和稳定具有重要的作用,在气候变化和人类活动的影响下,若尔盖湿地开始逐渐退化和萎缩,草地退化,土壤沙化现象明显,湿地生态系统的稳定性遭受严重破坏。本文根据若尔盖湿地的分布和区域特性,选取了 6 个样地进行土壤样品采集,测试分析了不同区域的土壤质地、养分特性以及水分变化特性,取得了一定的实验结果:

(1) 湿地土壤性质:按照国际制土壤分类标准,若尔盖湿地花湖地区 0 ~ 80 cm 深度土壤质地以壤土为主,达水曲、纳若桥、哈丘湖地区则以砂壤土为主,排水沟区域表层土壤到 65 cm 深度主要为砂壤土,80 cm 处则为壤土,喜马拉雅地区则为壤砂土。

湿地土壤养分:土壤有机质的变异系数相对较

大,其次为速效磷和速效钾,达水曲和喜马拉雅地区的碱解氮变异性最小;达水曲和喜马拉雅地区的有机质含量最低,且不同深度的变化和差异相对较小,其次为哈丘湖地区,而花湖区域的有机质含量最高,有机质含量花湖 > 纳若桥 > 排水沟 > 哈丘湖 > 达水曲 > 喜马拉雅。

(2) 湿地土壤水分特性:采用 Van Genuchten 模型可以很好地描述若尔盖湿地不同区域的土壤水分特征曲线,并对各个区域的 Van Genuchten 模型中的土壤水分特性参数进行率定,模型率定的饱和含水率与实测值基本一致,影响土壤水分特征曲线的几何形状的参数 A 和 n 值,喜马拉雅地区最大,土壤持水性能较低,其次为哈丘湖和排水沟地区,纳若桥地区最小,土壤持水性较好。有机质含量较高的花湖地区其土壤持水性和水源涵养功能也比较好。

总体上,若尔盖湿地在保护力度比较好的花湖、纳若桥等区域其土壤沙化现象要明显低于东部区域,排水沟区域由于近些年来人们对湿地认知的增

强,为了保护湿地的基本功能对一些排水沟进行诸如填沟围堵等工程措施,防止湿地水位下降,在一定程度上也对其土壤特性产生了影响。同样花湖和纳若桥地区的土壤有机质含量相对较高,土壤持水性相对较好,说明近年来在该区域的湿地保护工作具有一定的成效,而哈丘湖区域的土壤砂粒含量相对花湖区域偏高,有机质含量偏低,土壤持水性能较低,应该在该区域加强湿地保护管理工作,防止湿地土壤进一步沙化,增强土壤持水性能和湿地水源涵养功能。在达水曲和喜马拉雅也土壤沙化相对严重的区域应该重点进行湿地沙化治理,加强草地建设,改善湿地生态环境,防止湿地萎缩和退化。

参考文献:

- [1] BAI Junhong, OUYANG Hua, CUI Baoshan, et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoige Plateau in the past four decades[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2245 - 2252.
- [2] 沈松平, 王军, 杨铭军. 若尔盖高原沼泽湿地萎缩退化要因初探[J]. *四川地质学报*, 2003, 23(2): 123 - 125.
- [3] 郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J]. *高原气象*, 2007, 26(2): 422 - 428.
- [4] ZHAO Nana, GOU Si, ZHANG Beibei, et al. Changes in pan evaporation and their attribution to climate factors in the zoige alpine wetland, the eastern edge of the tibetan plateau (1969 - 2014)[J]. *Water*, 2017, 9(12): 971.
- [5] LI Binquan, YU Zhongbo, LIANG Zhongmin, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the zoige alpine wetland in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5): 1026 - 1035.
- [6] 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.
- [7] 闵泓翔. 若尔盖高原湿地退化现状、成因及恢复对策研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [8] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 等. 近40年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2245 - 2252.
- [9] 邓茂林, 田昆, 段宗亮, 等. 高原湿地若尔盖国家级自然保护区景观变化[J]. *山地学报*, 2010, 28(2): 240 - 246.
- [10] 游宇驰, 李志威, 李希来. 1990 - 2011年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(2): 62 - 69.
- [11] 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 等. 2007年和2016年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化[J]. *湿地科学*, 2017, 15(4): 522 - 525.
- [12] 胡光印, 董治宝, 魏振海, 等. 近30a来若尔盖盆地沙漠化时空演变过程及成因分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 908 - 916.
- [13] 游宇驰, 李志威, 黄草, 等. 1990 - 2016年若尔盖高原荒漠化时空变化分析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1671 - 1680.
- [14] 杨永兴, 李珂, 杨杨. 排水疏干胁迫下若尔盖高原沼泽退化评价指标体系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1826 - 1836.
- [15] 石承苍, 涂军. 川西北高原若尔盖草地沙化, 湿地退化遥感监测与对策研究[C]//全国湿地规划生态保护及合理开发利用研讨会, 成都: 2009.
- [16] 李晋昌, 王文丽, 胡光印, 等. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(12): 3451 - 3459.
- [17] 戴洋, 罗勇, 王长科, 等. 1961 - 2008年若尔盖高原湿地的气候变化和突变分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 35 - 42.
- [18] 李志威, 孙萌, 游宇驰, 等. 若尔盖高原实际蒸散量变化规律研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1317 - 1324.
- [19] 田应兵, 熊明标, 禾光煌. 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.
- [20] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5780 - 5788.
- [21] 张露, 王益权, 韩霁昌, 等. 基于van Genuchten模型的渭北苹果园土壤水分能量特征分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 120 - 126.
- [22] OTTONI M V, LOPESASSAD M L, MONTEIRO A E, et al. Evaluation of the performance of the van Genuchten equation using a large database on soil water retention of tropical soils in Brazil [C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2014.
- [23] 王小华, 贾克力, 刘景辉, 等. Van Genuchten模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 179 - 183 + 188.
- [24] 肖建英, 李永涛, 王丽. 利用Van Genuchten模型拟合土壤水分特征曲线[J]. *地下水*, 2007, 29(5): 46 - 47.
- [25] GREEN T R, CONSTANTZ J E, FREYBERG D L. Up-scaled soil-water retention using van Genuchten's function [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, 1(3): 123 - 130.