

DOI: 10.5846/stxb201607221492

税伟,白剑平,简小枚,祁新华,苏正安,陈勇,蔡应君.若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能研究.生态学报,2017,37(1): - .
Shui W, Bai J P, Jian X M, Qi X H, Su Z A, Chen Y, Cai Y J.Changes in water conservation and soil physicochemical properties during the recovery of desertified grassland in Zoigê, China .Acta Ecologica Sinica,2017,37(1): - .

若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能研究

税 伟^{1,2,*}, 白剑平², 简小枚¹, 祁新华³, 苏正安⁴, 陈 勇², 蔡应君⁵

1 福州大学环境与资源学院,福州 350116

2 四川农业大学农学院,成都 611130

3 福建师范大学地理科学学院,福州 350007

4 中国科学院山地灾害与环境研究所,成都 610041

5 若尔盖县林业局,若尔盖 624500

摘要:1995 年以来,政府大力开展对若尔盖沙化草地生态系统的恢复重建工作,其生态恢复效益受到广泛关注。而水源涵养功能作为衡量草地生态系统恢复程度的重要生态指标,其变化对水分循环及全球气候变化有一定的影响和响应。本文以若尔盖县不同治理年限的沙化草地治理区为研究对象(包括 1995 年、2007 年、2009 年、2010 年、2011 年的治理区,2012 年的正常放牧区和 2012 年的无治理区),采用野外采样和室内分析相结合的方法,将土壤含水量作为研究指标,结合土壤的理化性质,分析沙化草地在恢复重建过程中水源涵养功能的变化及其影响因素,结果表明:若尔盖草地在恢复重建过程中,(1)土壤质地发生变化,由紧砂土逐渐恢复成砂壤土,保水能力及肥性都得到显著提高;土壤容重随着治理时间的增加而降低,由无治理区的 1.7 g/cm³下降到正常放牧区的 1.3 g/cm³;(2)土壤 pH 值随着治理时间的增加而逐渐降低,由 7.6 逐渐下降到 6.7,土壤总体上为中性土,适宜植被生长;土壤有机质的变化相对不明显,但治理区的有机质远低于正常放牧区的土壤有机质,总体呈缓慢上升趋势;(3)土壤含水量呈“V”型变化趋势,在治理初期,土壤含水量先减小,2009 年治理区的含水量最低,仅为 6.8%,但到了治理后期,土壤的含水量开始增加,1995 年的沙化治理区含水量达到了 12.1%,说明水源涵养能力也得到相应的提升;(4)经过相关分析,土壤含水量和有机质、土壤质地、土壤 pH 值、生物量以及土壤碳含量呈显著相关关系,其中,含水量与有机质、土壤质地以及土壤碳含量呈极显著正相关,而与 pH 值呈显著负相关;(5)随着治理时间的增加,土壤退化指数逐渐减小,土壤状况得到不断的改善。

关键词:若尔盖草地;草地沙化;土壤理化性质;水源涵养

Changes in water conservation and soil physicochemical properties during the recovery of desertified grassland in Zoigê, China

SHUI Wei^{1,2,*}, BAI Jianping², JIAN Xiaomei¹, QI Xinhua³, SU Zheng'an⁴, CHEN Yong², CAI Yingjun⁵

1 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

3 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

5 Forestry Bureau of Zoigê County, Zoigê 624500, China

基金项目:美国国家地理科研基金(9336-13);国家自然科学基金(41401313);四川省教育厅自然科学重点项目(12ZA273)和福州大学人才基金(510211)联合资助

收稿日期:2016-07-22; **修订日期:**2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shuiweiman@163.com; shuiwei@fzu.edu.cn

Abstract: The restoration and reconstruction of desertified grassland has been continually initiated by the central government of China since 1995, and the ecological benefits of grassland restoration gained attention both home and abroad. In particular, the water conservation function of grassland is regarded as the primary indicator of the ecosystem's restoration and is one of the most important grassland ecosystem services. Changes in water conservation are related to the water cycle and global climate change. The present study investigates the moisture and physicochemical properties of desertified grassland soil over several years (managed sample plot in 1995, 2007, 2009, 2010, and 2011; non-managed sample plot in 2012; and normal grazing area in 2012) in Zoigê County, using both field investigation and experiments to analyze the dynamics of water conservation and its determinants. During the recovery process, 1) Soil texture had changed that tight sandy soil was gradually converted to sandy loam, water conservation and fertilizer preservation capacity were increased, and bulk soil density decreased from 1.7 g/cm^3 in the non-managed area to 1.3 g/cm^3 in the normal grazing area. 2) Soil pH value decreased from 7.6 to 6.7 with the duration of management, and according to the classification of soil pH, the soil was neutral soil which was suitable for vegetation growth. Meanwhile, soil organic matter of the treatment areas was far lower than that of the normal grazing area, although the organic matter exhibited an upward trend. 3) Soil moisture exhibited a V-shaped trend that the content decreased in the early stage of management and the content of managed area in 2009 was lowest for only 6.8%. But in the late stage of management, the content increased from 6.8% to 12.1% in the managed area in 1995, in which the grassland had been restored and water conservation got improvement. 4) Correlation analysis indicated that soil moisture was significantly correlated with organic matter content, soil texture, pH, biomass, and soil carbon content, although the relationship between soil moisture and pH was negative. 5) As the duration of treatment increased, the soil degradation index decreased, and the soil conditions improved greatly.

Key Words: Zoigê grassland; desertification; soil physicochemical properties; water conservation

若尔盖草原地处青藏高原的东部边缘,是长江、黄河流域重要的水源涵养调节地及我国生物多样性重要集中区,享有“高原之肾”的美誉,亦被科技界称为“中华民族的水塔”,具有重要的生态战略地位^[1]。若尔盖草原还是我国重要的草原牧区,不仅为人类的生存提供了产品和服务^[2],还能维持高寒地区生态系统的格局和功能,其兴衰对生态环境建设和社会经济的发展具有十分重要的影响^[3]。草地生态系统和气候条件关系密切,两者间存在复杂的反馈关系,一方面,若尔盖草地作为世界上独特的高寒草地生态系统,是北半球气候的重要启动区和调节区,影响着我国乃至全球的气候变化^[4];另一方面,气候变化通过影响草地生态系统的结构与功能显著地改变着草地生态系统提供服务的能力^[5]。“十三五”规划中提出,我国需深度参与全球气候治理,为应对全球气候变化做出贡献。因此,草地作为影响全球气候的环境敏感区与生态脆弱区,对其进行系统保育和合理利用是应对全球气候变化的重要举措^[6]。

近几年来,由于不合理的人类活动和自然因素的双重影响,若尔盖发生了不同程度的退化,孙小弟等人^[7-8]认为,草地退化导致草地生态系统发生逆行演替,改变了植被及其生境顶级或亚顶级状态的演替模式,不仅改变了植物群落特征,还影响固碳能力及水土保持等生态系统服务功能。生态系统服务通过支持、调节、供给和文化等各种功能,为人类福祉的达成起到了关键的作用,是人类福祉实现的基石^[9]。生态系统服务功能的丧失和退化将对人类福祉产生重要影响,威胁人类的安全与健康,也威胁着区域,乃至全球的生态安全^[10]。“十三五”规划中提出,需全面提升生态系统功能,保护治理草原生态系统,推进禁牧休牧轮牧和天然草地退牧还草工程,加强“三化”草原治理,使草原植被综合盖度达到 56%,并强化江河源头和水源涵养区的生态保护。我国草原的人为干扰方式主要有放牧、禁牧和农田开垦 3 种类型,放牧和农田开垦是造成草地逆向演替的主要不利干扰方式,而围封禁牧主要是采取自然恢复和人工恢复相结合的模式,使退化草地发生正向演替,恢复到不同的演替阶段,这是当前沙化草地恢复重建的重要措施之一^[11]。在草地退化及其负面效应已经成为影响牧区社会经济良性发展的核心问题的背景下,20 世纪 80 年代以来,国家政策性地对沙化草地

的恢复给予了重视,制定了相关的恢复重建措施,如围封禁牧、种草等治理模式,并取得非常显著的治理效果^[12]。但由于若尔盖高寒草地的可进入性的限制以及政府相关数据的缺乏,较少有学者从生态系统服务的角度对沙化草地的恢复重建过程及其所取得的生态效益给予评估。特别地,草地生态系统的水源涵养能起到很好的调节径流及消洪补枯的作用^[13-14],赵同谦^[15]和于格^[16]等人也认为水保作用是草地生态系统的重要生态服务功能之一,能起到截留降水和涵养水分的作用。但我国对水源涵养功能的研究相对较少,主要集中在森林、湿地生态系统和草地在退化过程中水源涵养功能的变化,如水源涵养林的建设以及水土保持的区划等,而较少针对沙化草地恢复重建过程中水源涵养功能的变化进行研究^[17],尤其对于政府恢复治理工程下的土壤水源涵养功能的变化研究就更少。

在全球水资源短缺的时代背景下,水资源的保护显得迫在眉睫^[18]。而若尔盖草地作为重要的生态服务功能区,其水源涵养能力在水文调节和植物生长上均有重要的作用,水源涵养功能的发挥受到土壤理化性质的显著影响^[19]。其中,水分不仅是影响植物生长的重要因素,也是沙化草地覆被恢复与重建的关键因子^[20]。草地水源涵养主要体现在植被水源涵养量和土壤水源涵养量两方面^[21]:一是植被不仅能涵养水源,还能调节气候,有“绿色水库”之称^[22],通过植被恢复重建有利于控制土壤沙化,降低水土流失^[23];另一方面,土壤有疏松性和持水性等独特的物理性质,有利于水分的涵养。由于土壤涵养能力高于植被对水源的涵养能力,是草地涵养水源的主体^[24],因此,以研究土壤水源涵养量为主,将土壤理化性质中的水分物理指标作为衡量土壤水源涵养量的基础指标,采用野外采样和室内分析相结合的方法,结合土壤的理化性质和土壤恢复指数衡量土壤的恢复程度,从生态系统服务的角度,评估 1995 年以来在政府的政策性恢复治理工程下,不同治理年限的沙化草地的水源涵养功能变化及其影响因素,进一步对政府重建及生态恢复效益研究提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

若尔盖高原位于青藏高原东北边缘,地理坐标介于 $102^{\circ}08'—103^{\circ}39'E$, $32^{\circ}56'—34^{\circ}19'N$ 之间,平均海拔 3500 m,是中国最大的高原。若尔盖高原主要的草地类型为湿地和草甸^[25],天然草原面积达 $80.84 \times 10^4 \text{ km}^2$,其行政区域主要包括四川省的若尔盖县、红原县、松潘县和阿坝县,甘肃省的碌曲县、玛曲县以及青海省的久治县(图 1)^[26]。若尔盖草原属于高山大陆季风气候区,为高寒温带湿润气候,冬季严寒,夏季凉爽,干雨季节分明,雨热同季,日照充足,昼夜温差大。由于若尔盖县特殊地理位置及经济优势,将其作为本文的研究区域。根据其气象数据显示,在 1981—2010 年,若尔盖县累年平均相对湿度 60%,年平均气温 1.4°C ,极端最高气温为 25.6°C ,极端最低气温为 -30.6°C ,年平均降雨量 642.8 mm,年均日照 2417 h,年平均风速 2.3 m/s ,最大风速为 36 m/s 。

若尔盖县的畜牧业主要以牦牛、绵羊和马为主。近几十年来,由于全球气候变化及放牧等因素的影响,若尔盖草地不断沙化,政府采取相应的恢复重建措施,出现了不同恢复程度的草地治理区,形成了多种生境类型并存的景观生态格局。未治理区由于过度放牧,植物组成相对简单,伴随出现沙生苔草等沙生植物。恢复治理区的植被组成与正常放牧的草地植被组成差别不大,包括豆科、禾本科牧草,以及莎草科、瑞香科和蔷薇科等杂类草^[27]。若尔盖草地的成土母质依不同地形有规律分布,多为三迭系砂岩、板岩和第四纪的松散堆积物,土壤含沙量比较高。

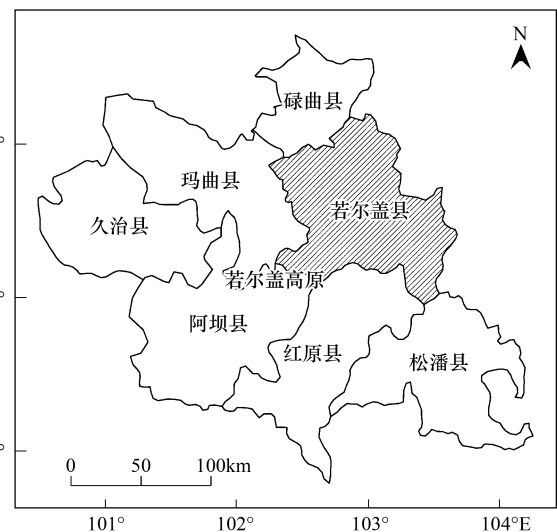


图 1 若尔盖县区位

Fig.1 Location in Zoigê Country

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

自 1995 年起,若尔盖林业局对草地采取围栏禁牧和栽种等多种方式并存的恢复治理措施。为了评估政府恢复治理工程的生态效益,依地貌、光热条件、基质等基本一致原则,于 2012 年 9 月选取林业局在 2011 年、2010 年、2009 年、2007 年和 1995 年实施恢复工程的治理区样地(记:A、B、C、D、E),并选择了 2012 年的无治理区样地(CK1)和正常放牧下的样地(CK2)进行比较,对这些样地的植被和土壤进行调查评估。以采样时间 2012 年作为基点,则 2011 年的治理年限为 1 年,2010 年的治理年限为 2 年,2009 年的治理年限为 3 年,2007 年的治理年限为 5 年,而 1995 年距采样时间的年限达到 17 年。其中,2011 年、2010 年、2009 年和 2007 年所实施的沙化治理措施相似,主要是采用植苗+种草+施肥+围栏的模式;而 1995 年沙化治理区由于当时条件的限制,主要采用将植树和种草相结合的农业栽种治理模式(E)(图 2)。

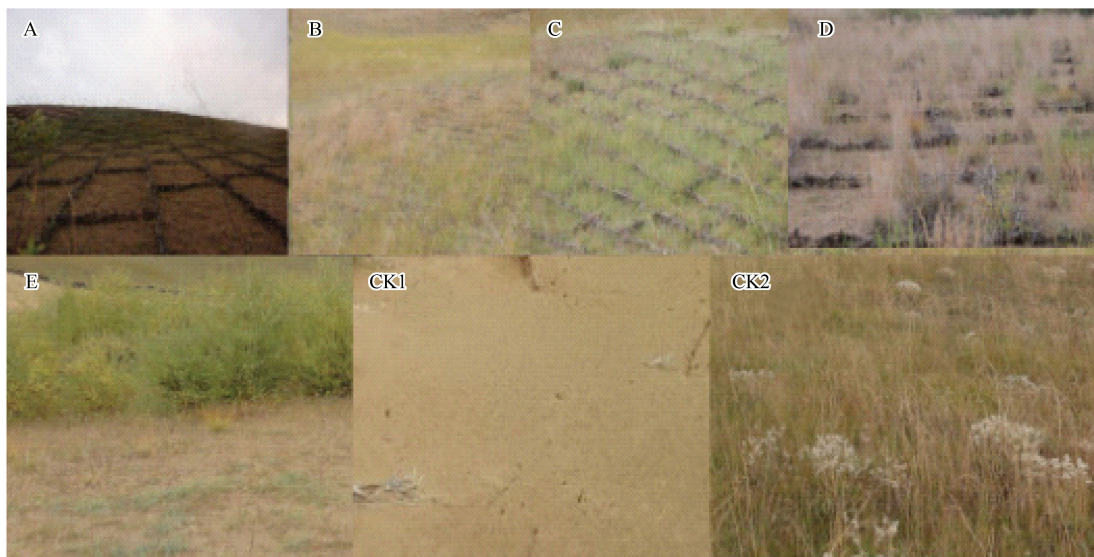


图 2 不同年限的治理样地

Fig.2 Test samples of different times

A:2011 年沙化治理区;B:2010 年沙化治理区;C:2009 年沙化治理区;D:2007 年沙化治理区;E:1995 年沙化治理区;CK1:未治理区;CK2:正常放牧区

在选取的样地上随机设置样方,样方面积 1 m×1 m,每一样地设 3 个样方,样方草地水平间距不小于 100 m^[28]。采用常规收获法采集样方的植被和土壤样本,调查内容包括:土壤容重、土壤质地、pH 值、有机质和土壤含水量以及植被群落基础数据。

1.2.2 数据处理

将采集的 0—20 cm 土壤样品经自然风干后磨碎,分别过 20 目和 100 目尼龙筛,保存待测,根据鲁如坤编写的《土壤农业化学分析方法》中的测定方法^[29],运用环刀浸水法测定土壤的容重;按照卡钦斯基的土壤质地简易分类法,测定土壤物理性黏粒(<0.01 mm)的含量;在水土比例为 5:1 的混合溶液下,运用酸度计进行测定土壤 pH 值;采用重铬酸钾—硫酸外加热氧化法测定样本的有机质^[30];利用风干土与在 105℃ 下的烘干土之间的差额来计算土壤含水量;而对于地上生物量的测定,主要是称已采集植被的鲜重,然后利用烘箱在 105℃ 下杀青 30 min,最后在 80℃ 下烘干至恒重,称其干重。

根据所测的土壤质地、土壤容重、土壤含水量、土壤 pH 值和土壤有机质,选取正常放牧草地作为基准土地利用类型,计算土壤退化指数,并通过土壤退化程度反向分析治理区土壤的恢复状况,土壤退化指数的计算公式^[31]:

$$DI = \frac{[(P_1 - P'_1)/P'_1 + (P_2 - P'_2)/P'_2 + \dots + (P_n - P'_n)/P'_n]}{n} \times 100\%$$

式中, DI 为土壤退化指数; $P'_1, P'_2 \dots P'_n$ 为作为基准的土地利用类型下的土壤各属性值; $P_1, P_2 \dots P_n$ 为其它土地利用类型下土壤各属性值; n 为选择的土壤属性数。

利用 SPSS 22.0 和 Excel 2003 软件对数据进行处理,分析不同治理年限的草地的水源涵养功能与土壤理化性质的相关性。

2 结果分析

2.1.1 土壤物理性质变化分析

土壤质地和土壤容重是土壤物理性质,其中,土壤质地是土壤中不同大小的矿物颗粒的组合状况,其与土壤通气、保肥、保水状况及耕作的难易有密切的关系,也是拟定土壤利用、管理和评价土壤肥力和作物生长适宜性的重要依据。根据卡钦斯基土壤质地基本分类方法,测定了土壤物理性黏粒($<0.01\text{ mm}$)的含量,发现未治理区和管护期少于 5 年的治理区的粒级含量小于 10%,为紧砂土;在管护期多于 5 年的治理区和正常放牧区的粒级含量大于 10%,为砂壤土(图 3a)。土壤容重是反映土壤孔隙度、土壤保水性和土壤保肥性的重要物理性状指标。通过环刀法测定不同治理年限的沙化土壤发现,未治理区(CK1)的土壤容重为 1.7 g/cm^3 ,正常放牧区(CK2)的土壤容重为 1.3 g/cm^3 ,不同治理年限草地的土壤容重随着治理时间的增加呈递减趋势(图 3b)。

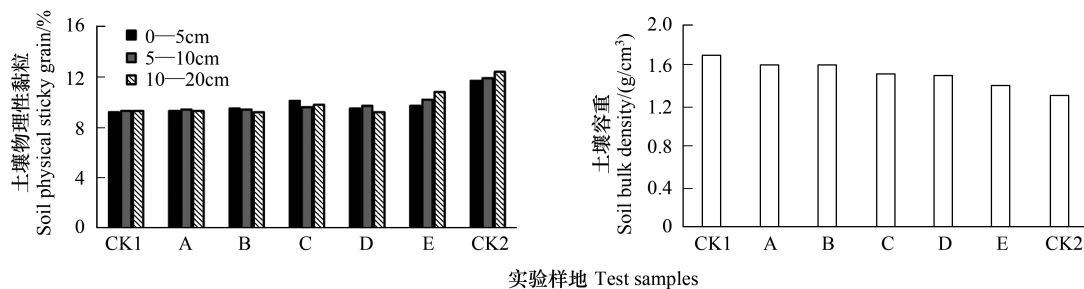


图 3 不同实验样地土壤质地(a)和土壤容重(b)变化

Fig.3 Change of soil texture (a) and bulk density (b) in different test samples

2.1.2 土壤化学性质变化

土壤 pH 值和土壤有机质是土壤的化学性质,土壤 pH 值是影响植物种类和群落演替的重要因素,而土壤有机质含量反映土壤肥力的高低,直接关系到植物生长发育的土壤环境和植物生物量。通过采集 0—5、5—10 cm 以及 10—20 cm 的土壤样本进行测定发现,若尔盖草地土壤总体呈中性。不同深度土壤的 pH 值随着治理年限的增加呈现减小的趋势。不同深度的土壤 pH 值的最高值都出现在管护期内,分别为 7.6、7.4 和 7.1,而最低值分别为 7.0、7.0 和 6.7;0—5 cm 土层的 pH 值最高,为 7.3—7.6,10—20 cm 土层的 pH 值最低,为 6.7—7.1(图 4a)。随着治理年限的增加,样地各土层的土壤有机质含量变化不明显,但总体呈先增加后减少的趋势。各层土壤有机质含量最大值都出现在 2007 年(D):0—5 cm 的土壤有机质最高为 1.24 g/kg ,5—10 cm 土壤有机质最高为 1.34 g/kg ,10—20 cm 的土壤有机质最高为 1.33 g/kg ;土壤有机质最低含量出现在 1995 年(E)(由于当时条件的限制,其治理模式与其他年限的模式略有差异),5—10 cm 土壤有机质仅有 0.86 g/kg ;且从图中可明显看出,不同治理年限的草地的有机质含量都远低于正常放牧区的有机质含量(图 4b)。

2.2 土壤持水性能变化

2.2.1 土壤含水量

草地的水土保持功能是凭借草地地下发达且成网络的根系和地上植被,通过稳定土壤、截留天然降水,缓解降雨势能对土壤的直接冲击,从而起到有效的固土保肥、防止风蚀和水蚀等作用。土壤含水量是土壤重要的物理性状之一,因地上植被、土壤类型、年降水量以及干扰因素的不同而导致土壤含水量有所差别。研究结

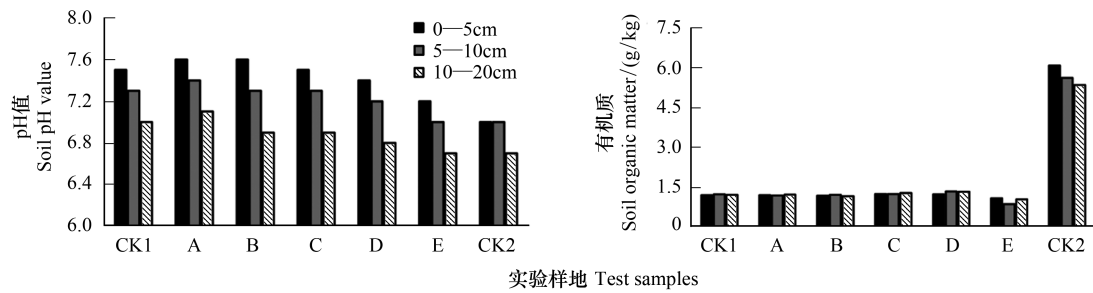


图4 不同实验样地土壤 pH 值 (a) 和有机质 (b) 的变化

Fig.4 Change of soil pH value (a) and organic matter (b) in different test samples

果表明:土壤含水量与治理年限没有存在明显的关联,但总体上治理区的土壤含水量远低于放牧区(图5)。在若尔盖高寒草地沙化治理区的恢复演替进程中,2011年(A)、2010年(B)、2009年(C)、2007年(D)和1995年(E)的土壤含水量分别为11.3%、10.6%、6.8%、8.4%和12.1%,而正常放牧区(CK2)的土壤含水量为23.2%。

2.2.2 土壤水源涵养的相关性

根据对若尔盖高寒草地沙化治理区的实地考察,结合实验数据分析表明,影响土壤含水量的主要因素有:土壤有机质、土壤质地、pH 值、生物量和土壤碳含量(表1)。其中,土壤含水量和土壤理化性质之间存在明显的相关关系:土壤含水量与有机质、土壤质地和土壤碳含量呈极显著正相关($P<0.01$);而与 pH 值呈显著负相关($P<0.05$);与生物量呈显著正相关($P<0.05$),植被盖度、土壤容重与土壤含水量之间没有明显的相关关系。

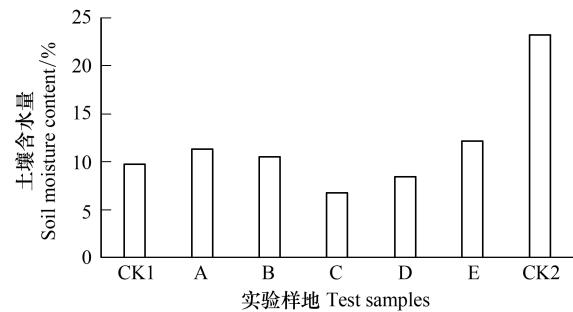


图5 不同实验样地土壤含水量变化

Fig.5 Change of the soil moisture content in different test samples

表1 土壤含水量的相关分析

Table 1 The correlation analysis of soil moisture content

	有机质 Organic matter	质地 Soil texture	容重 Soil bulk density	pH 值 pH value	生物量 Biomass	土壤碳含量 Soil carbon content	植被盖度 Vegetation coverage
含水量 Moisture content	0.959 **	0.923 **	-0.709	-0.845 *	0.887 *	0.954 **	0.565

* *. 表示在 0.01 的水平上显著; *. 表示在 0.05 的水平上显著

2.3 土壤恢复指数评价

设定基准土地利用类型为正常放牧区的草地,假设其它土地利用类型均由该基准的土地利用类型转变而来,计算土壤中各种属性的其它土地利用类型与基准土地利用类型之间的差异(以百分数表示),用土壤退化指数表示,反向分析经过生态工程治理后的土壤改良状况,由图6可看出,2011年(A)、2010年(B)、2009年(C)的土壤退化指数分别为-46%、-42%和-37% ($P<1\%$),土壤退化程度严重,恢复程度远低于正常放牧区(CK2),其中以2011年(A)的土壤恢复最慢;2007年(D)土壤退化指数为-29%,土壤退化程度较为严重,但

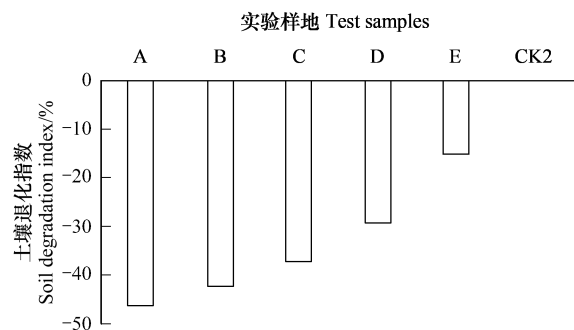


图6 不同实验样地的土壤退化指数

Fig.6 Soil degradation index in different test samples

恢复效果高于治理年限不超过 5 年的治理区;1995 年(E)土壤退化指数为-15%,与放牧区相比没有显著变化,说明 1995 年(E)土壤没有发生明显的退化。总体上,沙化草地随着治理时间的增加而显著恢复。

3 讨论

3.1 草地恢复过程中水源涵养变化

对若尔盖沙化草地政策性恢复治理过程的生态效益进行评估时发现,沙化草地治理区的生态恢复演替实质是土壤与植物相互作用与影响的过程,因此,对沙化草地采取围栏禁牧、施肥等多种治理措施后,植被与土壤间形成一个互作的良性循环系统,沙化草地发生正向演替,草地生态系统得到恢复。而水源涵养作为草地生态系统的重要服务功能之一,在土壤—植被恢复体系中得到了一定程度的改善^[32]。随着治理年限的推移,土壤含水量也逐渐增高,主要集中在 7%—12%之间,虽低于正常放牧区的土壤含水量,但比其他研究地区的沙化草地高 5—8 倍,这与李新荣对沙地水分动态的研究结论类似^[33]。无治理区的土壤含水量高于 2007 年、2009 年的草地治理区,这主要由于沙化地的孔隙度较大,降水能很快渗透,导致所测土壤含水量高于治理区的含水量^[34];从治理的 5 个样地的土壤含水量来看,2009 年治理样地的含水量最低,这主要由于草地超过管护期,区内呈现无序状态,放牧等活动的出现导致围栏等治理工程被破坏,人工植被遭到啃噬,使恢复效果不明显;但总体上,随着治理年限的增加,土壤含水量呈“V”字形变化,这种趋势的变化原因主要有:第一,由于降水的冲刷和土壤质地的改变,土壤孔隙被堵塞或挟带泥沙的水流进入土表时细小的颗粒沉淀在土壤表面形成一层薄的土壤结皮,导致水流无法往下渗,这种土壤结皮的存在对水分入渗能力产生一定的影响^[35];第二,根系对土壤下层水分的吸收和砂壤土的毛细管作用向上不断输送水分,导致治理区所测土壤水分反而降低;第三,在治理后期,随着植被的逐渐恢复,治理区土壤被植被及枯枝落叶覆盖,土壤中的水分不易蒸发,所测土壤含水量开始升高^[36],水分开始蓄留,土壤水源涵养功能得到恢复,也进一步说明政府实施的退耕还草工程、天然林保护工程起到了实质性的恢复效果。

3.2 水源涵养的影响因素及与各生态系统服务功能的关系

运用相关分析得出治理区土壤涵养水源的影响因素为土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机质、土壤碳含量和生物量,这些因子的变化对水源涵养功能起到了重要的作用。若尔盖草地由于放牧等人为因素的影响,土壤类型主要以紧砂土为主,总孔隙度小、保水性差、土壤含水量低、有机质矿化率高以及保肥性能弱,不利于植被生长,这与闵安民的研究结果一致^[37];但随着治理年限的增加,土壤理化性质逐渐改善,草地的土壤类型主要为砂壤土,砂壤土有利于土壤有机质和土壤孔隙度的增加,提高土壤渗透能力和吸附能力,使水源涵养功能得到改善^[38]。土壤 pH 值的变化显著影响群落演替和水土保持功能,经过沙化治理后,pH 值降低、土壤的容重降低以及质地提高,这些性质的改善为植物的生长提供了良好的生长环境,更有利于土壤水分的留存,这与 Wu 等人的研究结果一致^[39]。随着恢复进程的发展,植被的生长及其植被凋落物的累积开始促进土壤有机质含量的增加,但土壤有机质含量总体仍较低,这主要是由于沙化草地土壤中的有机质含有的可溶性元素会随水淋洗渗漏而流失,且水蚀对土壤的组分迁移有较大的影响,容易加剧有机质的分解,导致土壤中有机质含量的减少;另一方面,随着治理年限的增加,一年生植物开始增加,其根系太少不利于土壤有机质的积累,不利于碳含量流通以及水分的涵养^[40-41]。土壤碳含量的增加也有利于含水量的增加,如何志斌等^[42]对云杉林斑表层土壤的研究认为,土壤碳含量与含水量呈显著正相关性,有机碳含量增加会显著改善土壤的水源涵养功能。从相关分析可发现,土壤含水量和植被盖度、土壤容重没有显著的相关关系。当高寒草地退化后,土壤趋于干旱,持水能力减弱,土壤容重上升,孔隙度减小,保水性降低;通过政府对沙化草地的治理,高寒草地保持着原有的植物群落和较高植被覆盖度,根系的生长和盖度增加以及土壤中植物枯枝落叶的积累,使得土壤疏松多孔,进一步导致土壤容重降低,土壤上层具有较高的持水能力,降水通过表层向深层土壤渗透的速度缓慢,且具有较均匀的土壤水分空间分布,水源涵养功能得到恢复,但总的来说,即使进行了人工土壤改良措施,土壤水分含量与持水功能的改善进程也十分缓慢,这与其他研究不一致,杨晓晖等^[43]认为,不同的植被类型、土壤

容重以及土地覆盖都会对土壤的水源涵养功能产生不同程度的影响。植被恢复对水分有积极作用,虽然植被盖度和土壤含水量没有显著相关性($P>0.05$),但土壤质地和生物量都显著影响植物盖度($P<0.05$),说明植被盖度可通过影响土壤的性质间接影响土壤含水量,如王根绪等^[44]对高寒草地植被盖度与水分循环之间的关系研究发现,植被盖度与水分呈显著的正相关。

草地各生态系统服务之间存在着一定的权衡和协同关系^[45],在沙化草地的治理过程中,主要采取围封禁牧、种草等的理措施,减少草地的产品供给能力从而提高其他生态系统服务,如调节、支持服务,这不仅有利于提高人类社会的福祉,而且将极大地保障人类后代从草地生态系统所获取的利益。另一方面,草地生态系统中,多重生态系统服务之间存在着相互增益的协同关系:生物量和水分的密切关系,水分是生物量形成的主要限制因子,土壤含水量越高,则地上生物量越高,水分对地上生物量的影响具有放大效应^[46],而植物生物量是衡量植物初级物质生产功能的重要指标,说明水源涵养能力的提高有助于植物初级生产能力的提升。反过来,随着治理年限的增加,植物初级物质生产能力以及固碳能力的变化有助于草地土壤持水性能的进一步改善。植物盖度作为生物多样性的指标之一,植被盖度的提高不仅使草地具有截流降水的功能,而且比空旷裸地有较高的渗透性和保水能力,对土壤涵养水源有着重要的意义,同时在生物多样性功能提高时,水源涵养功能也得到了一定程度的恢复。总的来说,在政府的恢复治理工程下,草地生态系统的结构和功能逐渐改善,水源涵养功能也得到相应的提高。

4 结论

若尔盖草地在恢复重建过程中,土壤质地由紧砂土逐渐恢复成砂壤土,土壤保水性能提高;土壤容重随治理时间的增加而降低,由 1.7 g/cm^3 下降到 1.3 g/cm^3 ;而土壤 pH 值也从 7.6 逐渐下降到 6.7,根据土壤酸碱度分类,土壤呈中性,更有利于植被的生长;土壤有机质的变化不明显,总体呈缓慢上升趋势,但仍远低于正常放牧区的土壤有机质;土壤含水量呈先减小后增加的“V”字形变化;土壤质地、有机质、土壤碳含量以及地上生物量的改变有利于土壤水源涵养能力的变化,而土壤 pH 值是造成水源涵养功能下降的重要因素;随着治理年限的增加,土壤逐渐恢复并趋近正常放牧区的状态。总之,随着生态工程的进行,土壤的理化性质得到了持续的改善,治理区的水土保持功能得到了不断的增强。

参考文献 (References):

- [1] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, Yan C Z. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Aeolian Research*, 2015, 19: 275-281.
- [2] Bai J H, Lu Q Q, Wang J J, Zhao Q Q, Ouyang H, Deng W, Li A N. Landscape pattern evolution processes of alpine wetlands and their driving factors in the Zoige plateau of China. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(1): 54-67.
- [3] 毕润成. 生态学. 北京: 科学出版社, 2012: 285-287.
- [4] Cui Q, Wang X, Li C H, Cai Y P, Liu Q, Li R. Ecosystem service value analysis of CO_2 management based on land use change of Zoige alpine peat wetland, Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 158-165.
- [5] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 杨宗贵. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响. *草业学报*, 2003, 12(1): 4-10.
- [6] Wang M, Yang G, Gao Y H, Chen H, Wu N, Peng C H, Zhu Q A, Zhu D, Wu J H, He Y X, Tian J Q, Zhao X Q, Zhang Y. Higher recent peat C accumulation than that during the Holocene on the Zoige Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 114: 116-125.
- [7] Zhang X H, Liu H Y, Xing Z S. Challenges and solutions for sustainable land use in Ruergai-the highest altitude peatland in Qinhai-Tibetan Plateau, China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1019-1025.
- [8] 孙小弟, 董全民, 马玉寿. 高寒草甸退化草地分级标准研究现状. *青海畜牧兽医杂志*, 2008, 38(4): 54-55.
- [9] Daily G C, Ouyang Z Y, Zheng H, Li S Z, Wang Y K, Feldman M, Kareiva P, Polasky S, Ruckelshaus M. Securing natural capital and human well-being: innovation and impact in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 677-685.
- [10] 李琰, 李双成, 高阳, 王羊. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [11] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 242-248.
- [12] Zuo D P, Xu Z X, Yao W Y, Jin S Y, Xiao P Q, Ran D C. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields

- from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 238-250.
- [13] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. *生态学报*, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [14] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 何先进. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能. *生态学报*, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [15] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [16] 于格, 鲁春霞, 谢高地. 草地生态系统服务功能的研究进展. *资源科学*, 2005, 27(6): 172-179.
- [17] 戴其文, 赵雪雁. 生态补偿机制中若干关键科学问题——以甘南藏族自治州草地生态系统为例. *地理学报*, 2010, 65(4): 494-506.
- [18] 郭进考, 史占良, 何明琦, 张相岐, 张爱民, 贾旭. 发展节水小麦缓解北方水资源短缺——以河北省冬小麦为例. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 876-879.
- [19] 徐翠, 张林波, 杜加强, 郭杨, 吴志丰, 徐延达, 李芬, 王凤玉. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响. *生态学报*, 2013, 33(8): 2388-2399.
- [20] McMurtrie R E, Benson M L, Linder S, Running S W, Talsma T, Crane W J B, Myers B J. Water/nutrient interactions affecting the productivity of stands of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 1990, 30(1-4): 415-423.
- [21] 孙艳红, 张洪江, 杜士才, 李根平. 四面山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 109-112, 117-117.
- [22] 王颖, 魏国印, 张志强, 张芹. 7种园林树种光合参数及水分利用效率的研究. *河北农业大学学报*, 2006, 29(6): 44-48.
- [23] 孙昌平, 刘贤德, 雷蕾, 王有科, 张学龙. 祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 68-72, 77-77.
- [24] 陈国华, 陈海艳, 李宝福, 张鼎华. 沿海沙地木麻黄更新迹地6种相思树的水源涵养功能比较. *防护林科技*, 2012, (2): 1-4.
- [25] Li J C, Wang W L, Hu G Y, Wei Z H. Changes in ecosystem service values in Zoige Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 766-770.
- [26] Zhang X Y, Lu X G. Multiple criteria evaluation of ecosystem services for the Ruorgai Plateau Marshes in southwest China. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1463-1470.
- [27] Xiang S, Guo R Q, Wu N, Sun S C. Current status and future prospects of Zoige Marsh in eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 553-562.
- [28] Zhang Y W, Deng L, Yan W M, Shanguan Z P. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2016, 137: 52-60.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-289.
- [30] Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982.
- [31] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响——以河北省遵化市为例. *地理学报*, 2001, 56(4): 447-455.
- [32] 王蕙, 王辉, 黄蓉, 马维伟. 不同封育管理对沙质草地土壤与植被特征的影响. *草业学报*, 2012, 21(6): 15-22.
- [33] 李新荣, 张志山, 王新平, 刘立超, 黄磊. 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 845-852.
- [34] 史长光, 泽柏, 杨满业, 肖冰雪. 川西北沙化草地植被恢复后土壤理化性质的变化. *草业与畜牧*, 2010, (4): 1-4, 32-32.
- [35] 杨秀莲, 张克斌, 曹永翔. 封育草地土壤生物结皮对水分入渗与植物多样性的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 853-856.
- [36] 何念鹏, 周道玮, 吴玲. 极端干旱干扰下松嫩草原土壤含水量与植物的反映. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(3): 52-56.
- [37] 闵安民, 刘敏, 王莉, 鄢武先, 张小平. 若尔盖湿地和草地退化过程中土壤理化性质的变异. *四川林业科技*, 2012, 33(2): 46-48, 34-34.
- [38] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 钱鞠. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响. *科学通报*, 2002, 47(23): 1771-1777.
- [39] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [40] 邵玉琴, 雍世鹏, 廖仰南, 赵吉, 张桂枝. 人工植被固沙工程系统稳定性的土壤微生物数量的初步分析. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1995, 26(1): 75-79.
- [41] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [42] 何志斌, 赵文智, 刘鹄, 苏永中. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [43] 杨晓晖, 张克斌, 侯瑞萍. 封育措施对半干旱沙地草场植被群落特征及地上生物量的影响. *生态环境*, 2005, 14(5): 730-734.
- [44] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 王军德. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 653-659.
- [45] Martín-López B, Gómez-Baggethun E, García-Llorente M, Montes C. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 220-228.
- [46] 白永飞. 降水量季节分配对克氏针茅草原群落初级生产力的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(2): 155-160.