

黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征

焦菊英, 焦峰, 温仲明

(中国科学院、水利部水土保持研究所; 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 现存不同植物群落的土壤水分和养分特征对有效干预和调控植被恢复有着非常重要的参考价值。在黄土高原丘陵沟壑区的吴旗, 对不同恢复方式(封禁下的自然恢复、无管理下的自然恢复、人工造林、人工种草)下的植被样方进行调查与采样, 采用典范变量分析, 研究了不同植物群落的土壤水分和养分变化特征。结果表明, 封禁自然恢复植物群落的土壤水分、有机质、全氮、有效氮、全磷和速效钾含量相对较高; 近 20 年及以上的人工林地群落与人工草地群落下的土壤水分和速效磷含量很低; 无管理下的自然恢复植物群落、4 年轮的沙棘林地群落和农田的土壤水分含量和速效磷含量较高, 而土壤有机质、全氮、有效氮、全磷和速效钾含量较低。这些植被群落下的土壤水分含量变化在凋萎湿度和 50% 田间持水量之间, 均处于严重亏缺状态, 土壤养分也处于较低的水平。相比之下, 人工植被消耗大量的深层土壤水分, 特别是 20 年轮以上的人工林地及人工草地, 其 200~500cm 土层的土壤含水量几乎接近凋萎湿度。综合分析表明, 封禁自然恢复是黄土高原丘陵沟壑区植被恢复的有效措施。

关键词: 植被恢复; 土壤水分; 土壤养分; 退耕地; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S152; S153

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2006)05-0667-08

Soil water and nutrients of vegetation communities under different restoration types on the hilly-gullied Loess Plateau

JIAO Ju-ying, JIAO Feng, WEN Zhong-ming

(Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and MWR; Inst. of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-technology Univ. of Agri. and For., Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The characteristics of soil water and nutrients in the existent vegetation communities are the very important references for intervening and regulating vegetation restoration. Based on the field survey in Wuqi on the hilly-gullied Loess Plateau, the variation of soil water and nutrients under different vegetation restoration types were analyzed by Canonical Variate Analysis. It was showed that the natural restoration community without disturbance had higher soil water content, organic matter, extractable nitrogen, total phosphorus and exchangeable potassium; communities with long-term (nearly 20 years and more than 20 years) planted trees and planted grasses had lower soil water content and exchangeable phosphorus; natural vegetation communities without management, along with croplands and 4 years old *Hippophae rhamnoides* community experienced higher exchangeable phosphorus and soil water content, but lower organic matter, total nitrogen, extractable nitrogen, total phosphorus and exchangeable potassium. The soil water content of these communities, ranging from the wither moisture to 50% of field water holding capacity, was in severe deficient state; the soil nutrients are also in the lower level for vegetation to develop well. Planted vegetation, especially more than 20 years old planted trees and planted grasses consumed much more soil water than vegetation in natural restoration, and the soil water content in 200—500cm soil layers was almost near to wilting point. The results suggested that natural restoration without disturbance could be the better measure for vegetation restoration in the study sites.

收稿日期: 2005-06-28 修改稿收到日期: 2006-03-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40571094、40271074); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”项目(01140301)资助。

作者简介: 焦菊英(1965—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与水土保持环境效应评价研究。

Key words: vegetation restoration; soil water; soil nutrients; abandoned cropland; hilly-gullied Loess Plateau

黄土丘陵沟壑区,坡耕地占总耕地面积的70%~90%,土壤侵蚀模数超过 $50\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{[1-2]}$ 。为了遏制水土流失,退耕还林(草)已在黄土高原地区大规模地展开。但是,植被控制水土流失最主要的条件在于植被的结构特征,即具有良好的结构、一定的覆盖度、一定数量的枯枝落叶层、发达的根系和一定的年龄^[3-6];而植被的结构与土壤的水分和养分状况有着非常密切的关系。土壤水分作为调节植物群落演变的主要因子,在干旱半干旱地区长期处于匮乏状态,从而影响着植物群落的结构和复杂性,以及水土保持作用的大小^[7]。不同土壤养分影响着植物群落的生物量大小、物种组成和多样性^[8]。土壤氮素决定着植物群落的生产力、多样性和物种的入侵能力^[9-11];磷素在多种土壤类型中是个限制因子^[12-16],决定着植被生产力的大小和物种的组成变化^[13];钾素也影响着群落的生物量^[14]和植物的水分状态,有助于克服土壤水分的胁迫^[17]。可见,在植被恢复与重建中,应该考虑退耕地的土壤特性,以保证选择理想而现实的植被恢复目标^[8];而现存不同植物群落的土壤水分和养分特征对有效干预和调控植被恢复有着非常重要的参考价值。为此,本研究通过对不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分效应分析,来评价黄土高原沟壑区有效的植被恢复方式,以期为加快黄土高原退耕地植被恢复提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

吴旗县位于 $36^{\circ}33'33''\sim 37^{\circ}24'27''\text{N}$, $107^{\circ}38'57''\sim 108^{\circ}32'49''\text{E}$,地处暖温带半干旱森林草原水力侵蚀带和暖温带半干旱草原风蚀、水力侵蚀带的过渡区,属于黄土高原梁状丘陵沟壑区,谷宽梁缓,间有少数残丘低岭,海拔在1233~1809m之间。气候属于半干旱温带大陆性季风气候,年平均气温 7.8°C ,年平均降雨483.4mm,无霜期146d^[18]。水土流失严重,地带性土壤已损失殆尽,退耕地土壤主要为在黄土母质上发育起来的黄绵土。天然植被已全遭破坏,荒坡的主要物种有百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giralaui*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、萎陵菜(*Potentilla chinensis*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等;人工林主要以刺槐

(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus Simonii*)、柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主。

1.2 研究方法

由于黄土高原丘陵沟壑区的植被恢复是一个缓慢的演替过程,造成较早撂荒土地的使用历史和种植情况信息获取非常困难,且在调查中的不确定性很大,因而采取“空间代时间”的方法,通过大量的样地调查来分析不同恢复方式下植物群落间土壤养分与水分的相对平均状况,探讨黄土丘陵沟壑区较为适宜的植被恢复方式。

2003年8月在黄土高原地区的吴旗县对不同恢复方式下的植物群落,及其土壤水分养分特征进行了调查采样。植被的恢复包括:无管理下的自然恢复、封禁下的自然恢复、人工造林和人工种草。在调查的32个样方中,无管理下自然恢复的群落可分为3个:即猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)为优势种的群落,赖草(*Leymus scalinus*)为优势种的群落和长芒草(*Stipa bungeana*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)为优势种的群落;封禁下的自然恢复群落为星毛萎陵菜(*Potentilla acaulis*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giralaui*)和长芒草(*Stipa bungeana*)为优势种的群落;人工林地群落有沙棘林群落(*Hippophae rhamnoides*)、柠条林群落(*Caragana intermedia*)、刺槐林群落(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨林群落(*Populus simoni*);人工草地群落有紫花苜蓿群落(*Medicago sativa*)、沙打旺群落(*Astragalus adsurgens*)另外还有农田作物群落。植物群落的基本特征见表1。

样地分布在沟间地的梁岭坡上,海拔高度1400~1600m,坡度变化在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间。植被调查样方大小为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,调查内容包括植物的种类、盖度、数量、高度、地上生物量和频度等,群落的年限通过询问当地的村长和长者得到。

在植被调查的同时,利用土钻法对0—500 cm土层的土壤进行取样,取样间隔为20 cm,然后采用烘干法测定所采土层的土壤水分含量;并采集了0—20 cm土层的土壤分析样品,每个样点按S形采样混合,样品风干后分别过1 mm和0.25 mm筛。土壤有机质的测定采用重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)容量—外加热法;全氮采用半微量开氏法($\text{K}_2\text{SO}_4\text{—CuSO}_4\text{—Se}$ 蒸馏法);全磷采用钼锑抗比色法($\text{HClO}_4\text{—H}_2\text{SO}_4$ 法);

表 1 不同恢复方式的植物群落
Table 1 Vegetation communities under different restoration types

恢复方式 Restoration types	群落 Community	主要草树种 Main species	样方数 Plot No.	平均年龄 Average age	盖度 Cover (%)
农田 Croplands	作物 Crops	马铃薯 (<i>Solanum tuberosum</i>) 燕麦 (<i>Avena sativa</i>)	2		30~40
无管理下的自然恢复 Natural restoration without management	猪毛蒿等为主的群落 <i>Artemisia scoparia</i> dominated community	猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>) 赖草 (<i>Leymus scalinus</i>) 糙叶黄耆 (<i>Astragalus scaberrimus</i>) 山苦菜 (<i>Ixeris chinensis</i>) 小薊 (<i>Cirsium segetum bunge</i>)	6	6	30~40
	赖草等为主的群落 <i>Leymus scalinus</i> dominated community	赖草 (<i>Leymus scalinus</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>) 糙叶黄耆 (<i>Astragalus scaberrimus</i>) 山苦菜 (<i>Ixeris chinensis</i>) 阿尔泰狗娃华 (<i>Heteropappus altaicus</i>)	4	6	40~70
	长芒草等为主的群落 <i>Stipa bungeana</i> dominated community	长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 达乌里胡枝子 (<i>Lespedeza davurica</i>) 芡蒿 (<i>Artemisia giralaai</i>) 糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>)	3	20	40~50
封禁下的自然恢复 Natural restoration without disturbance	星毛萎陵菜等为主的群 落 <i>Potentilla acaulis</i> dominated community	星毛萎陵菜 (<i>Potentilla acaulis</i>) 铁杆蒿 (<i>Artemisia gmelinii</i>) 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 芡蒿 (<i>Artemisia giralaai</i>) 地椒 (<i>Thymus mongolicus</i>) 冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>)	6	40	50~70
人工林 Planted trees	沙棘群落 <i>Hippophae rhamnoides</i> community	沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>) 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>)	2	4	35~50
	柠条群落 <i>Caragana intermedia</i> community	柠条 (<i>Caragana intermedia</i>) 糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>) 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 铁杆蒿 (<i>Artemisia gmelinii</i>) 阿尔泰狗娃华 (<i>Heteropappus altaicus</i>) 赖草 (<i>Leymus scalinus</i>)	2	18	40~60
	刺槐群落 <i>Robinia pseudoacacia</i> community	刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>) 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 达乌里胡枝子 (<i>Lespedeza davurica</i>) 铁杆蒿 (<i>Artemisia gmelinii</i>) 芡蒿 (<i>Artemisia giralaai</i>) 赖草 (<i>Leymus scalinus</i>)	2	33	60~70
	小叶杨群落 <i>Populus simonii</i> community	小叶杨 (<i>Populus simonii</i>) 沙珍棘豆 (<i>Oxytropis gracillima</i>) 北京隐子草 (<i>Cleistogenes pekingensis</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>) 达乌里胡枝子 (<i>Lespedeza davurica</i>)	3	60	20~40
人工草 Planted grasses	紫花苜蓿群落 <i>Medicago sativa</i> community	紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>) 山苦菜 (<i>Ixeris chinensis</i>)	1	6	35(收割后, After harvest)
	沙打旺群落 <i>Astragalus adsurgens</i> community	沙打旺 (<i>Astragalus adsurgens</i>) 赖草 (<i>Leymus scalinus</i>) 猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>)	1	9	70

速效氮采用碱解扩散法;速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠(NaHCO₃)浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用原子吸收光谱法(NH₄OAc 浸提法)^[19]。

1.3 数据分析

采用典范变量分析(Canonical Variate Analysis, CVA)来分析不同植物群落与土壤因子之间的对应关系^[20]。典范变量分析(CVA)属于线性多变量方法,为线性判别分析,其基本思想和主要目的是来寻找样本组间的最佳判别解释变量^[21]。用于分析的土壤水分、养分因子为 0—200cm 土层的平均土壤含水量(各 20cm 土层的平均值)、200—500cm 土层的平均土壤含水量(各 20cm 土层的平均值)、土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷和速效钾。土壤水分因子的选择是基于年降雨下渗深度在 200cm 以上^[22],所以在分析中选择 0—200 cm 和 200—500 cm 土层的土壤水分含量作为土壤水分因子。利用“Monte Carlo permutation test”来检验 CVA 排序轴特征值的显著性,采用的置换次数为 999。

2 结果与分析

2.1 植物群落与土壤水分和养分因子的对应关系

根据 11 个植物群落与 8 个土壤水分、养分因子,对退耕地植物群落与土壤因子的关系进行了 CVA 分析,结果见图 1。其 Monte - Carlo 置换检验结果表明所有的排序轴都是显著的(第一排序轴 $P = 0.01$,所有排序轴 $P = 0.001$)。由于全氮的膨胀因子(Inflation factor)大于 20,就将全氮没有引入该 CVA 模型中,因为在排序分析中,变量的膨胀因子应小于 20,若大于 20,对回归方程的贡献不大,且不稳定^[20]。然而,全氮和有机质、速效氮之间存在着密切的相关关系(有机质与全氮 $r = 0.938$, $P < 0.001$;有机质与速效氮 $r = 0.920$, $P < 0.001$;全氮和速效氮 $r = 0.959$, $P < 0.001$),它们对植被具有相似的作用^[8],因此,该模型中也就间接地包括了全氮的信息。该模型的排序轴 1 和排序轴 2 解释了 52.8%的植物群落与这些土壤因子的关系,四个排序轴则解释了 83.9%。

CVA 的第一、第二轴的二维排序图直观地反映了植物群落与土壤各因子的对应关系(图 1)。图中土壤因子用箭头表示,箭头连线的长度表示植物群落分布及其特征与该因子相关程度的大小,连线越长,相关性越大;反之越小。箭头所处的象限表示土壤环境因子与排序轴的正负相关性。箭头连线与

排序轴的夹角代表土壤环境因子与该排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高;反之越低^[20]。由图 1 可以看出,11 个植物群落被清楚地划分为 3 组:1)封禁下自然恢复的植物群落;2)近 20 年及以上的人工林地群落(柠条林地、刺槐林地、小叶杨林地)和人工草地群落;3)无管理下的自然恢复的群落、4 年沙棘林地群落和农田。封禁下自然恢复植物群落的土壤有机质、速效氮、全磷和速效钾的含量相对较高,同时也具有较高的土壤水分含量;近 20 年及以上的人工林地群落和人工草地群落下的土壤水分含量和速效磷含量相对较低;无管理自然恢复下的群落、4 年沙棘林地群落和农田的土壤水分、速效磷含量较高,而土壤有机质、速效氮、全磷和速效钾含量较低。

2.2 不同植物群落下的土壤水分和养分特征

11 个植物群落下的土壤水分和养分含量如表 2 所示。封禁下自然恢复的植物群落的土壤养分含量最高,有机质、全氮、全磷和速效氮、速效磷、速效钾分别为 12.7、0.79、0.56 g/kg 和 50.5、0.9、89.1 mg/kg;其次为人工刺槐林地群落,分别为 10.3、0.61、0.57 g/kg 和 45.6、0.97 和 101.4 mg/kg。虽然紫花苜蓿具有固氮作用,但在不断收割利用的情况下,土壤养分含量很低,特别是有机质、全氮、速效氮含量。其它群落的土壤有机质含量变化在 5.0 ~ 8.0 g/kg,全氮为 0.34 ~ 0.43 g/kg,速效氮为 22.5 ~ 30.1 mg/kg,速效钾为 34.1 ~ 73.9 mg/kg。对于土壤水分来说,人工植物群落除 4 年龄沙棘幼林群落外,0—200cm 土层的平均土壤水分含量在 6.3% ~ 8.2%之间,200—500cm 土层的平均土壤水分含量则在 4.2% ~ 5.8%之间;而自然恢复的植物群落分别为 9.8 ~ 11.6%和 7.6 ~ 8.9%,分别比人工林地群落高 41.5% ~ 55.6%和 53.5% ~ 81.0%。农田 0—200cm 土层和 200—500cm 土层的土壤水分各为 10.6%和 11.2%,比人工林地群落平均高 55.0%和 133.3%,与自然群落相比,0—200cm 土层的土壤水分含量基本相近,而 200—500cm 土层高 35.8%。虽然封禁下自然恢复的植物群落和人工刺槐林地群落的养分效应比较相近,但二者土壤水分的含量差异很大,0—200cm 和 200—500cm 的平均土壤水分含量,封禁下自然恢复的植物群落分别为 11.6%和 8.0%,人工刺槐林地群落分别为 6.5%和 4.4%,相差 44%和 45%。

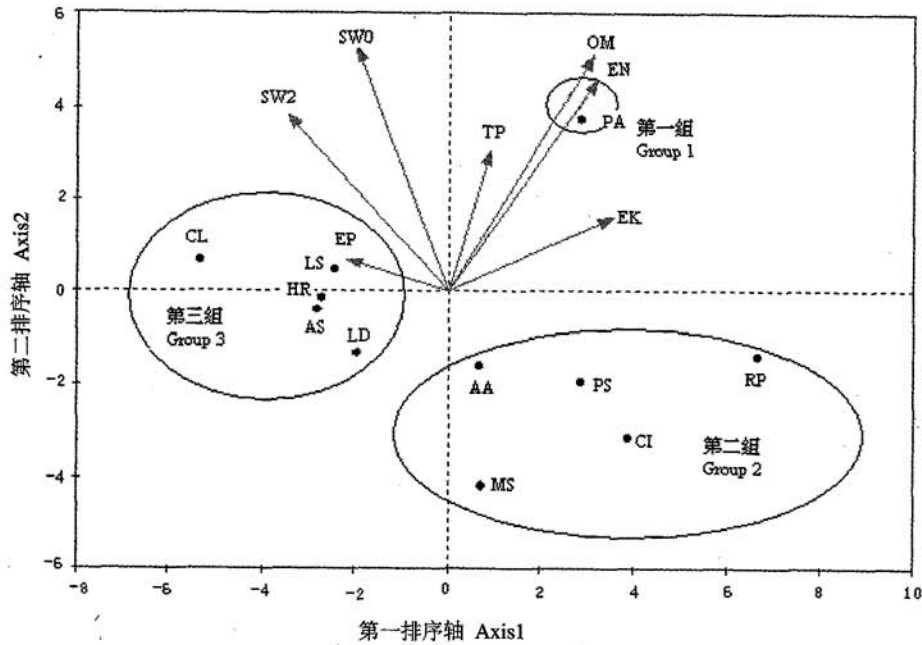


图1 不同植物群落与土壤因子的 CVA 二维排序图(第一与第二排序轴)

Fig.1 The two-dimensional CVA ordination diagram of vegetation communities and soil variables

[实心圆圈代表不同的植物群落: CL—作物 Crops; AS—猪毛蒿等为主的群落 *Artemisia scoparia* dominated community; LS—赖草等为主的群落 *Leymus scalinus* dominated community; SB—长芒草等主的群落 *Stipa bungeana* dominated community; PA—星毛萎陵菜等为主的群落 *Potentilla acaulis* dominated community; HR—沙棘群落 *Hippophae rhamnoides* community; CI—柠条群落 *Caragana intermedia* community; PS—刺槐群落 *Robinia pseudoacacia* community; RP—小叶杨群落 *Populus simonii* community; MS—紫花苜蓿群落 *Medicago sativa* community; AA—沙打旺群落 *Astragalus adsurgens* community。箭头表示土壤因子: OM—土壤有机质 Organic matter (g/kg); TP—全磷 total phosphorus (g/kg); EN—速效氮 Extractable nitrogen (mg/kg); EP—速效磷 Exchangeable phosphorus (mg/kg); EK—速效钾 Exchangeable potassium (mg/kg); SW0—0 到 200cm 土层的平均土壤水分含量 Average soil water content in 0—200cm soil layers (%); SW2—200 到 500cm 土层的平均土壤水分含量 Average soil water content in 200—500cm soil layers(%)]

表 2 不同植物群落的土壤养分和水分含量

Table 2 Soil water and nutrients content of vegetation restoration communities

群落 Community	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	速效氮 Extractable nitrogen (mg/kg)	速效磷 Exchangeable phosphorus (mg/kg)	速效钾 Exchangeable potassium (mg/kg)	土壤水分(%) Soil water content	
							0—200cm	0—500cm
CL	5.9	0.40	0.58	23.5	2.30	46.2	10.6	11.2
AS	6.5	0.43	0.53	28.3	1.39	41.6	10.9	8.9
LS	7.5	0.43	0.54	25.5	1.44	45.6	11.0	7.6
SB	5.4	0.37	0.53	22.5	0.75	57.9	9.8	8.5
PA	12.7	0.79	0.56	50.5	0.90	89.1	11.6	8.0
HR	6.6	0.34	0.53	24.1	0.94	40.7	10.1	8.6
CI	7.3	0.43	0.56	29.4	0.75	73.9	6.5	4.2
PS	8.0	0.49	0.51	30.1	0.58	83.2	6.7	5.8
RP	10.3	0.61	0.57	45.6	0.97	101.4	6.5	4.4
MS	4.6	0.28	0.53	21.7	0.87	45.0	8.2	4.7
AA	8.4	0.43	0.50	27.7	1.43	34.1	6.3	4.9

注(Note): CL—作物 Crops; AS—猪毛蒿等为主的群落 *Artemisia scoparia* dominated community; LS—赖草等为主的群落 *Leymus scalinus* dominated community; SB—长芒草等主的群落 *Stipa bungeana* dominated community; PA—星毛萎陵菜等为主的群落 *Potentilla acaulis* dominated community; HR—沙棘群落 *Hippophae rhamnoides* community; CI—柠条群落 *Caragana intermedia* community; PS—刺槐群落 *Robinia pseudoacacia* community; RP—小叶杨群落 *Populus simonii* community; MS—紫花苜蓿群落 *Medicago sativa* community; AA—沙打旺群落 *Astragalus adsurgens* community。

3 讨论

1) 根据这次调查资料,不同植物群落下0—200cm土层和200—500cm土层的土壤水分变化分别为5.0%~12.0%和4.0%~9.0%,而黄绵土的凋萎湿度为3%~4%,田间最大持水量为20%~23%^[23],也就是说,土壤水分状况处于凋萎湿度与约50%田间最大持水量之间。研究表明,对于刺槐林地,土壤水分8%~12%时处于亏缺状态,>15%时处于充足状态;对于小叶杨林地,土壤水分为8%~16%时为亏缺状态,>20%时处于充足状态^[24]。然而,本次调查测得33年龄的刺槐林地和60年龄的小叶杨林地0—200cm土层的平均土壤水分含量分别仅为6.5%和6.7%,200—500cm土层的平均土壤含水量分别为4.4%和5.8%,则处于非常严重的亏缺状态。可见,黄土丘陵沟壑区的土壤水分状况严重限制着黄土高原人工林的持续良好生长及其生态功能的发挥。

2) 依据黄土高原丘陵沟壑区人工林地土壤肥力分级^[25],所调查植物群落土壤全磷处于中等水平(0.4~0.6 g/kg),速效磷处于很低水平(<3 mg/kg);对于土壤有机质、全氮和速效氮,封禁下的自然恢复群落和人工刺槐林地均处于中等水平(分别为10~15、0.5~1.0和40~70 mg/kg),其它群落则处于低或很低水平;对于速效钾来说,封禁下的自然恢复群落、刺槐林地群落、小叶杨林地群落和柠条林地群落处于中等水平(70~150 mg/kg),而其它的群落处于低或很低水平。可见,黄土高原丘陵沟壑区不同植物群落的土壤肥力状况,除40年封禁下的自然恢复植物群落、20年以上人工刺槐林地群落的土壤有机质、全氮、速效氮和速效钾水平处于中等水平外,其它均处于低或很低的水平。黄土高原低产林的主要原因在于土壤肥力低,特别是速效磷处于非常低的水平^[24]。可见,在黄土丘陵沟壑区的退耕地植被恢复中,磷肥干扰措施值得探讨与重视。

3) 分析结果表明,封禁下的植被自然恢复群落的土壤水分和土壤养分效应都相对较高;近20年龄及以上的人工林地、9年龄的沙打旺草地、6年龄的紫花苜蓿草地消耗更多的土壤水分,特别是深层土壤,几乎接近凋萎湿度;无管理下的植被自然恢复下的群落的土壤养分含量与农田的相近,前人的研究也表明无管理下的植被自然恢复不利于土壤养分的积累,在干旱和过度放牧下的退耕地易导致土壤退化,降低入渗能力,加剧土壤侵蚀的发生^[26-27]。

4) 在黄土高原丘陵沟壑区,植物对水分的需求几乎依赖于土壤水分,而土壤水分的补充则完全依赖于降水。该区的年降水量在350~550 mm之间,其中70%的降雨集中在雨季(6~9月份),由几场暴雨造成^[28],加上黄土高原超渗产流的特点,径流系数高达60%以上,伴随着土壤养分的大量流失,从而使得有限的水资源更加有限,土壤更加贫瘠。因此,选择适宜的退耕地植被恢复方式,以有效地利用有限水资源和土壤资源,实现生态系统的可持续发展非常重要。

5) 实践证明,为了防止水土流失,自1949年以来,黄土高原的植树造林从来就没有停止过,但不到10%的造林面积被认为具有较高的盖度^[29];20世纪80年代初期,飞播沙打旺,人工种植红豆草,虽3年内长势喜人,但5年后逐渐衰亡^[30],并且人工林草消耗更多的土壤水分而形成土壤干层^[31-32],200cm以下土层的土壤水分一旦消耗,就很难补充或者需要很长的时间^[33-34],而且土壤干层的存在有着由人工草地重新变成光山秃岭的潜在危险^[32]。可见,黄土高原植被恢复与生态环境建设的矛盾在于,一方面期望通过大量的造林种草来控制水土流失,以改善自然生态环境;另一方面,人工林草不仅达不到有效防止水土流失的目的^[35],而且大量消耗有限的水资源,造成土壤干层,妨碍降雨入渗补充地下水^[36],从而威胁着生态环境的可持续发展。

综上所述,封禁下的植被自然恢复是黄土高原丘陵沟壑区比较好的植被恢复方式。

参考文献:

- [1] 唐克丽,张科利,雷阿林.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,1998,43(5):200-203.
Tang K L, Zhang K L, Lei A L. Critical slope gradient for compulsory abandonment of farmland on the hilly Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(5): 200-203.
- [2] Lu C H, van Ittersum M K, Rabbinge R. Quantitative assessment of resource-use efficient cropping systems: A case study for Ansai in the Loess Plateau of China[J]. Europ. J. Agronomy, 2003, 19: 311-326.
- [3] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998. 113-114.
Wu Q X, Yang W Z. Forest and grassland vegetation conservation and its sustainable development in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1998, 113-114.
- [4] 李勇.黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M].北京:科学出版社,1995. 64-119.
Li Y. Plant roots and soil anti-scourability on the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1995. 64-119.

- [5] Kosmas C, Danalatos N G, Gerontidis St. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions[J]. *Catena*, 2000, 40: 3-17.
- [6] Cammeraat E L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 317-332.
- [7] Bellot J, Sanchez J R, Chirino E *et al.* Effect of different vegetation type cover on the soil water in semi-arid areas of South Eastern Spain[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1999, 24: 353-357.
- [8] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A *et al.* Association between lowland grassland plant communities and soil properties[J]. *Biological Conservation*, 2002, 105: 199-215.
- [9] Chapin F S, Vitousek P M, Van Cleve K. The nature of nutrient limitation in plant communities[J]. *American Naturalist*, 1986, 127: 48-88.
- [10] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands[J]. *Science*, 1996, 274: 1720-1723.
- [11] Brooks M L. Effects of increased soil nitrogen on the dominance of alien annual plants in the Mojave Desert[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40: 344-353.
- [12] Janssens F, Peeters A, Tallowin J R B *et al.* Relationship between soil chemical factors and grassland diversity[J]. *Plant and Soil*, 1998, 202: 69-78.
- [13] Kirkham F W, Mountford J O, Wilkins R J. The effects of nitrogen, potassium and phosphorus addition on the vegetation of a Somerset peat moor under cutting management[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 1013-1029.
- [14] Oomes M J M, Ol H, Altana H J. Effects of vegetation management and raising the water table on nutrient dynamics and vegetation change in a wet grassland[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 576-588.
- [15] Willems J H, Peet R K, Bik L. Changes in chalk grassland structure and species richness resulting from selective nutrient additions[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4: 203-212.
- [16] 王国梁,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵地区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. *水土保持学报*, 2001, 22(1): 1-5.
Wang G L, Liu G B, Xu M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 22(1): 1-5.
- [17] Sangakkara U R, Frehner M, Nosberger J. Influence of soil moisture and fertilizer potassium on the vegetative growth of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and vovpea (*Vigna unguiculata* L. Walp)[J]. *J. Agronomy and Crop Science*, 2001, 186: 73-81.
- [18] 任洪玉,温仲明,杨勤科. 黄土沟壑区植被恢复及其物种多样性的变化—以吴旗县植被恢复为例[J]. *干旱区农业研究*, 2003, 21(2): 154-158.
Ren H Y, Wen Z M, Yang Q K. Vegetation restoration and variation of species diversity in the loess hilly-gullied region-Case study on the vegetation restoration in Wuqi County[J]. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2003, 21(2): 154-158.
- [19] 刘光嵩. 土壤理化分析与剖面描述(中国生态系统研究网络观测与分析标准方法)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 9-43.
- [20] Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles (The standard methods of observation and analysis of ecological system research network in China)[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1996. 9-43.
- [21] ter Braak C J F, Smlauer P. CANOCO reference manual and canodraw for windows user's guide, software for canonical community ordination (Version 4.5)[M]. Wageningen: Biometris, Wageningen and české Budějovice, 2002. 99-234.
- [22] Jongman R H G, ter Braak C J F, van Tongeren O F R. Data analysis in community and landscape ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 32-56.
- [23] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(3): 7-14.
Sun C Z, Huang B L, Chen H B *et al.* Interaction between soil water condition and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(3): 7-14.
- [24] 侯庆春,黄旭,韩士峰,张孝中. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 II. 土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系[J]. *水土保持学报*, 5(2): 75-83.
Hou Q C, Huang X, Han S F, Zhang X Z. The reason and improving approaches of small-old-tree on the Loess Plateau region II. The status of soil moistures and nutrients and their relationships with tree growth in small-old-tree stands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(2): 75-83.
- [25] 许明祥,刘国彬,卜崇峰. 黄土丘陵地区人工林地土壤肥力评价[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1367-1371.
Xu M X, Liu G B, Bo C G. Soil fertility evolution of planted forest lands on the hilly-gullied Loess Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* 2003, 23(8): 1367-1371.
- [26] Cerda A. Soil erosion after land abandonment in a semiarid environment of southeastern Spain[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11: 163-176.
- [27] Evans R. Curtailing grazing-induced erosion in a small catchment and its environs, the Peak District, Central England[J]. *Applied Geography*, 2005, 25: 81-95.
- [28] Zhang X, Quine T A, Walling D E. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China: An investigation using ¹³⁷Cs and rill measurements[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 171-189.
- [29] Tian J L. Restoring the eco-environment in conformity natural law - Some considerations on the vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2003, 17(2): 101-106.
- [30] 秦保芳. 黄土高原生态建设未吸取“造林不见林”的教训 [OL]. <http://www.cas.cn/Html/Dir0/02/80/69.htm>, 2002.

- Qin B F. Learn from the lesson "planting trees, but no forest" in the ecological construction on the Loess Plateau[OL]. <http://www.cas.cn/Html/Dir0/02/80/69.htm>. ,2002.
- [31] 穆兴民,徐学选,王文龙,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(2): 210-217.
- Mu X M, Xu X X, Wang W L *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 210-217.
- [32] 侯庆春,韩瑞莲,韩士峰.黄土高原人工草地“土壤干层”问题初探[J].中国水土保持,1999,(5): 11-14.
- Hou Q C, Han R L, Han S F. The issue of 'dried soil layer' in planting tree and grass lands on the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1999 (5): 11-14.
- [33] 张信宝.黄土高原植被建设的科学检讨和建议[J].中国水土保持,2003(1): 17,32.
- Zhang X B. Scientific analysis and suggestions on vegetation construction on the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003, (1): 17, 32.
- [34] 张春霞,郝明德,魏孝荣,王旭刚.黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6): 604-607.
- Zhang C X, Hao M D, Wei X R, Wang X G. Soil water distribution characteristics of alfalfa with different planting years in the gully region of Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004,10(6): 604-607.
- [35] 李国英.关于黄河长治久安的思考[N].光明日报,2001-08-07.
- Li G Y. Considerations on the control and safety of the Yellow River [N]. *Guangming Daily*, Aug. 7th, 2001.
- [36] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5): 427-432.
- Li Y S. Effect of forest on land water circulation on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427-432.