

# 荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益

荣浩<sup>1</sup>, 何京丽<sup>1</sup>, 张欣<sup>1</sup>, 张林<sup>2</sup>, 杨红艳<sup>2</sup>

1. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010

**摘要:** [目的] 以内蒙古四子王旗境内退化荒漠草原为研究区域, 研究不同植被恢复模式对植物群落组成、土壤含水量、土壤侵蚀的影响, 为退化草原水土流失治理和草原生态建设提供理论依据。[方法] 针对退化草原特点、水土流失特征, 分析不同植被恢复模式下植物群落特征、土壤水分、地表径流和侵蚀量的变化, 运用主成分分析对不同植被恢复模式的水土保持生态效益进行评价。[结果] 退化荒漠草原的 3 种植物恢复模式试验样地的植物种类组成、群落总盖度、地上生物量均高于放牧天然草地, “围栏封育+灌木条带+施肥复壮”、“围栏封育+松土补播+草种包衣”2 种植物恢复模式的地上生物量与放牧天然草地之间变化差异达到显著水平 ( $p < 0.05$ ); 3 种植物恢复模式的实施有效控制了土壤侵蚀, 径流量和土壤侵蚀量均低于天然草地。[结论] “围栏封育+松土补播+草种包衣”植被恢复模式在保持水土资源, 增加群落稳定性等方面的生态效益最好。

**关键词:** 荒漠草原; 恢复模式; 水土保持; 生态效益; 主成分分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)05-0295-06

中图分类号: S157.2, S812.2

**文献参数:** 荣浩, 何京丽, 张欣, 等. 荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 295-300. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.042; Rong Hao, He Jingli, Zhang Xin, et al. Ecological benefits of soil and water conservation in different vegetation restoration patterns on desert steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 295-300.

## Ecological Benefits of Soil and Water Conservation in Different Vegetation Restoration Patterns on Desert Steppe

Rong Hao<sup>1</sup>, He Jingli<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Zhang Lin<sup>2</sup>, Yang Hongyan<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water

Resources of China, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 2. Inner Mongolia

Hotision Monsod Drought-resistance Greening Co., Ltd, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study was to provide a theoretical basis for soil erosion control and ecological reconstruction of degraded grasslands, by studying the effects of different vegetation restoration modes on plant community composition, soil moisture content and soil erosion in the degraded desert steppe of Siziwang Banner, Inner Mongolia. [Methods] The characteristics of degraded grassland and soil erosion were used to analyze changes in the plant community, soil moisture, surface runoff and erosion under different vegetation restoration modes. The principal component analysis was used to evaluate the ecological benefits of soil and water conservation based on different vegetation restoration models. [Results] The plant species, total community coverage and aboveground biomass of the three vegetation restoration modes experimental plots in degraded desert steppe were higher than those in grazing natural grassland. The difference in above-ground biomass amounts between the two vegetation restoration modes of “enclosure + shrub strip + fertilization for rejuvenation” and “enclosure + loosening soil for re-sowing + grass seed coating” and the grazing natural grassland reached a significant level ( $p < 0.05$ ); The implementation of these three vegetation restoration

收稿日期: 2019-03-29

修回日期: 2019-04-26

资助项目: 国家重点研发计划项目“荒漠化退化草地治理技术及示范”(2016YFC0500500); 内蒙古自治区科技重大专项项目“重点区域荒漠化过程与生态修复研究示范”(zdx2018058)。

第一作者: 荣浩(1969—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为草地水土保持与生态用水。E-mail: mksrh@126.com。

models effectively controlled soil erosion, making runoff and soil erosion less than that occurring in natural grassland. [Conclusion] The vegetation restoration model of “enclosure + loosening soil for re-sowing + grass seed coating” has the best ecological benefits for conserving water and soil resources and increasing the stability of communities.

**Keywords:** desert steppe; restoration pattern; soil and water conservation; ecological benefit; principal component analysis

广泛分布于内蒙古中部、阴山山脉以北乌兰察布高原地区的荒漠草原是内蒙古草原的重要组成部分,荒漠草原以其独特的种类组成、结构和功能,以及地理分布规律和自然景观,成为亚洲中部一种特殊的、十分重要的生态系统类型<sup>[1]</sup>。近些年,环境因子的变化以及不合理的人类活动使荒漠草原的生态系统正在发生深刻变化,干旱频发,导致沙漠化、盐渍化急剧发展和植被退化<sup>[2]</sup>。

荒漠草原植物种类贫乏,草丛低矮,生态系统稳定性差,一旦退化很难恢复,它的良性循环和可持续发展与草地生态环境密切相关<sup>[3]</sup>。目前中国在退化草地生态恢复方面已经有很多的研究成果,主要恢复技术包括围栏封育、补播、松土、浅耕翻、火烧、施肥、灌溉、施枯草或秸秆、除毒草、石膏改良等,这些草地植被恢复技术具有综合性、交叉性、边缘性等特点<sup>[4-10]</sup>;对于草地生态系统恢复的评价主要侧重于植被覆盖度、地上生物量、生物多样性和土壤质量的恢复等方面<sup>[11-14]</sup>。

本研究通过分析内蒙古自治区四子王旗境内的退化荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益,从植物生长状况、土壤水分保持、抗水蚀能力等方面探讨不同植被恢复模式对保持荒漠草原水土资源、恢复受损生态系统的适宜性,以期解决当前退化草原水土保持措施的优化配置问题提高生态恢复效果,加快修复进程,为退化草原的水土流失治理和生态建设提供理论和实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区四子王旗查干补力格苏木境内,属于典型中温带大陆性气候,多年平均气温 3.4 °C,  $\geq 10$  °C 的年积温为 2 200~2 500 °C,多年平均降水量为 298 mm,降水量集中在 6—9 月,占全年降水总量 70% 以上,无霜期 175 d。试验区主要以淡栗钙土为主<sup>[15]</sup>。研究区地带性植被为短花针茅荒漠草原,是一种草原区向荒漠区过渡的荒漠草原生态系统类型,短花针茅草原占到中国温性荒漠草原总面积的 11.2%,对荒漠草原的生态系统的整体功能有很大的影响<sup>[16]</sup>。试验区为放牧的天然草地,原生植被草层低矮,植物种类组成较少,主要建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*),主要伴生种有栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等,植被盖度为 21%~26%。

### 1.2 试验设计

于 2015 年选择地势较为平坦、植被盖度相近的区域布设 3 种植被恢复模式试验区,以长期放牧形成退化的天然草地作为对照样地(CK),植被恢复模式分别设置为:围栏封育试验样地(I)、“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”试验样地(II)、“围栏封育+松土补播+草种包衣”试验样地(III)。各试验样地基本情况见表 1。

表 1 试验样地 2015 年基本情况

处理	样地名称	主要恢复措施
I	围栏封育	退化草地设钢丝围栏措施
II	围栏封育+灌木条带+施肥复壮	围封草地内,灌木条带间隔 8 m 布设,穴植驼绒藜( <i>Caragana korshinskii</i> ),灌木带间天然草地采取施肥措施(地表追肥),雨季 1 hm <sup>2</sup> 施加尿素 300 kg,连续施肥 2 a。
III	围栏封育+松土补播+草种包衣	围封草地内,松土带间 40 cm,松土深度 10 cm,补播牧草的播带宽 20 cm,补播牧草披碱草( <i>Elymus dahuricus</i> )和沙生冰草( <i>Agropyron desertorum</i> )。
CK	天然草地	放牧草地,无措施

注:表中 I 为围栏封育试验样地;II 为“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”试验样地;III 为“围栏封育+松土补播+草种包衣”试验样地。下同。

### 1.3 试验方法

于 2017 年生长旺盛期(8 月初)调查植物群落特征并测定土壤含水量。在各个试验样地内随机布设 3

条 100 m 样带,样带间隔 100 m,沿样带每隔 10 m 布设 1 个 1 m×1 m 样方,记录每个样方内出现的植物种类、群落总盖度,采用收割法测定地上生物量,即将

样方内植物地面以上的所有绿色部分齐地刈割(样方内灌木属矮小灌木,与草本植物一并刈割收获),不种植物种按样方分别装进纸袋,65℃恒温下烘至恒重,称其干重,测定植物群落地上生物量;测定生物量的同时,采用 TRIME-PICO TDR 便携式土壤水分测量仪结合烘干称重法测定 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤含水量。

2017年5月在每个植被恢复模式试验区选取坡度基本一致的区域,分别布设1个自然坡面径流小区(5 m×3 m),四周以铝塑板进行围挡,径流小区底部设计集流桶,每次降雨后观测径流量和泥沙量,观测时间为2017年6月至2017年9月。①径流量观测。每次降雨产流结束后测定集流桶内水位高度,乘以集流桶底面积,推算出一次降雨过程的径流量。②泥沙量观测。径流测定后,将桶内水分充分搅浑,用铝盒取水样,每次取60 ml,3次重复,现场测定浑水重量,记录浑水体积,静置3 h,过滤掉清水,置于105℃下烘箱12 h,测定干土重量,换算成土壤侵蚀量。

#### 1.4 数据分析

利用 SPSS Statistics 17.0 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析 LSD 法(least significant difference, LSD)比较不同植被模式下的差异( $p=0.05$ ),采用主成分分析法<sup>[17-19]</sup>对不同植被恢复模式的水土保持生态效益进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被恢复模式植物群落特征的变化

对比分析3种植被恢复模式和天然草地的植物群落特征,结果见表2。“围栏封育+松土补播+草种包衣”(Ⅲ)试验样地出现的植物种类最多,共有15种多年生草本植物,3种1 a, 2 a生植物。与之相比较,围栏封育样地(Ⅰ)的植物种类最少(12种多年生草本植物,2种1 a, 2 a生植物)。但经方差分析,各试验样地之间植物种类组成变化差异未达到显著水平( $p>0.05$ ),说明荒漠草原实施不同植被恢复模式的初期阶段对植物群落物种组成没有明显影响。“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”(Ⅱ)、“围栏封育+松土补播+草种包衣”(Ⅲ)试验样地的植物群落总盖度要显著高于封育样地(Ⅰ)和对照样地(CK)( $p<0.05$ )。测定生长旺盛期(8月初)不同植被恢复模式的地上生物量,结果表明,“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”(Ⅱ)试验样地地上生物量最高,其次为“围栏封育+松土补播+草种包衣”(Ⅲ);这两种恢复模式的地上生物量分别比放牧的天然草地(CK)增加了18.17, 14.08 g/m<sup>2</sup>,这2种恢复模式的地上生物量与天然草

地之间的变化差异达到显著水平( $p<0.05$ );Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ3种模式的地上生物量之间的变化差异不显著( $p>0.05$ )。

表2 不同植被恢复模式植物群落特征的变化

指标	植被恢复模式			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	CK
多年生植物种类/个	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>
1 a, 2 a生植物种类/个	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
群落总盖度/%	27 <sup>a</sup>	35 <sup>b</sup>	33 <sup>b</sup>	23 <sup>a</sup>
地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	63.92 <sup>ab</sup>	74.89 <sup>b</sup>	70.80 <sup>b</sup>	56.72 <sup>a</sup>

注:表中不同小写字母表示不同植被恢复模式之间差异显著,显著水平 $p<0.05$ 。下同。

### 2.2 不同植被恢复模式土壤含水量变化

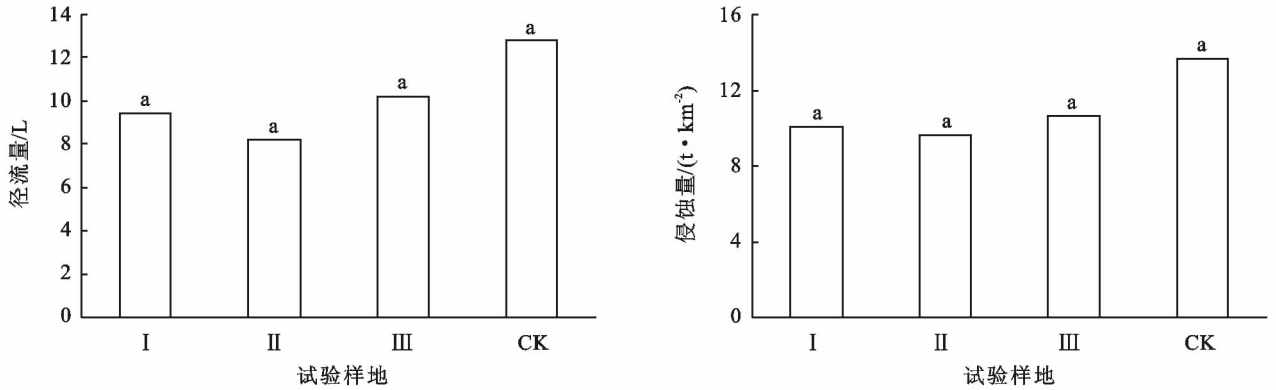
植被生长旺盛期不同土层土壤含水量变化如表3所示。随着土壤深度的增加试验区土壤含水量随之增加,3种植被恢复模式和天然放牧草地的0—20 cm 土层土壤含水量变化在10.65%~12.65%之间,变化差异不明显( $p>0.05$ );20—40 cm 土层土壤含水量由大到小依次为:Ⅱ>Ⅲ>CK>Ⅰ,“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”试验样地(Ⅱ)20—40 cm 土层土壤含水量显著高于围栏封育(Ⅰ)和天然草地(CK);不同植被恢复模式40—60 cm 土层土壤含水量变化中,对照样地(CK)土壤含水量最大,围栏封育试验样地(Ⅰ)土壤含水量最低,但差异不显著( $p>0.05$ )。

表3 不同深度土壤含水量的变化 %

土层深度/cm	植被恢复模式				平均值
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	CK	
0—20	10.65 <sup>a</sup>	11.23 <sup>a</sup>	12.65 <sup>a</sup>	11.98 <sup>a</sup>	11.63
20—40	10.93 <sup>a</sup>	16.78 <sup>b</sup>	14.98 <sup>ab</sup>	11.24 <sup>a</sup>	13.48
40—60	11.85 <sup>a</sup>	15.97 <sup>a</sup>	16.91 <sup>a</sup>	17.64 <sup>a</sup>	15.59

### 2.3 不同植被恢复模式径流和侵蚀的变化

试验观测期间内共有天然降雨7次,累计降雨量为172.6 mm,产生地表径流5次,6月份、7月份各1次,8月份3次,对比不同植被恢复模式下坡面径流小区的累积径流量和侵蚀量结果发现(见图1),3种植被恢复模式中,“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”(Ⅱ)、围栏封育(Ⅰ)、“围栏封育+松土补播+草种包衣”(Ⅲ)的地表径流量分别比天然草地(CK)降低了35.9%,26.6%,20.3%,推算的3种植被恢复模式的土壤侵蚀量变化在9.64~10.65 t/km<sup>2</sup>之间,均低于天然草地侵蚀量,虽然不同植被恢复模式的径流量和侵蚀量与天然草地之间的变化差异未达到显著水平( $p>0.05$ ),但也说明了实施植被恢复措施后植被盖度和密度增加,地表粗糙率加大,进而使地表径流减小,有效控制了土壤侵蚀。



注:图中 I 为围栏封育; II 为“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”; III 为“围栏封育+松土补播+草种包衣”。不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 不同植被恢复模式径流量和侵蚀量比较

## 2.4 水土保持生态效益评价

采用 SPSS Statistics 17.0 软件对不同植被恢复模式的植被特征(多年生植物种类, 1, 2 a 生植物种类、群落总盖度、地上生物量)、土壤水分(0—20, 20—40, 40—60 cm 土层土壤含水量)、径流量和侵蚀量的 9 个指标进行主成分分析, 得到主成分特征值和贡献率(见表 4)。

表 4 水土保持生态效益指标主成分特征值及贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.558	61.758	61.758
2	2.792	31.026	92.784

表 5 水土保持生态效益指标主成分载荷

主成分	侵蚀量( $x_1$ )	径流量( $x_2$ )	地上生物量( $x_3$ )	多年生植物种类( $x_4$ )	1, 2 a 生植物种类( $x_5$ )	20—40 cm 含水量( $x_6$ )	40—60 cm 含水量( $x_7$ )
1	-0.965	0.919	0.948	0.798	-0.216	0.736	-0.335
2	0.260	0.384	0.293	0.391	0.889	0.605	0.926

计算 3 种植物恢复模式水土保持生态效益评价各个主成分的单因子得分, 根据各单因子得分与其特征值贡献率确定主成分综合得分模型, 即把各主成分得分作为变量, 同时将各主成分方差贡献率占总方差贡献率的百分比作为权重<sup>[18]</sup>, 2 个主成分得分模型( $Z_i$ )如下:

$$Z_1 = 0.165 Y_{j1} - 0.174 Y_{j2} + 0.144 Y_{j3} - 0.039 Y_{j4} + 0.171 Y_{j5} + 0.132 Y_{j6} - 0.060 Y_{j7}$$

$$Z_2 = 0.138 Y_{j1} + 0.093 Y_{j2} + 0.140 Y_{j3} + 0.318 Y_{j4} + 0.105 Y_{j5} + 0.217 Y_{j6} + 0.332 Y_{j7}$$

根据主成分综合得分模型( $Z_1, Z_2$ )评价 3 种植物恢复模式的水土保持生态效益, 各主成分得分排序见表 6。主成分综合得分值出现正负值现象, 是由于所有数据都经过标准化处理, 根据主成分分析法评价的意义, 主成分综合得分值并不代表评价对象的实际水平量值, 而是代表其在评价对象整体中所处的相对位

置<sup>[20]</sup>。因此, 植被恢复模式综合得分值越大, 代表在所有评价对象中该种模式的水土保持生态效益越好。根据表 6 可知, “围栏封育+松土补播+草种包衣”(III) 植被恢复模式的水土保持生态效益最好, 其次为“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”(II), 相比其他两种植物恢复模式, 退化荒漠草原仅实施围栏封育(I) 水土保持生态效益较低。

表 6 水土保持生态效益指标主成分得分

主成分	植被恢复模式		
	I	II	III
1	-0.056	0.328	0.347
2	-1.160	0.170	0.429
排序	3	2	1

## 3 讨论

在草地生态系统管理中, 围栏封育、施肥、补播、翻耕、划破、火烧、灌溉等措施是退化草地植被恢复的

主要调控途径,实施这些措施可以增加植物群落物种多样性,提高初级生产力,改变植物种间竞争格局,改良土壤理化性质<sup>[4-6,9,21-24]</sup>。近年来,草地恢复逐步从单项技术改良转向系统综合治理,形成了以生物多样性维持、群落结构优化配置、土壤及种子库修复为主的恢复治理技术<sup>[25]</sup>。本研究在退化荒漠草原生态恢复过程中,在围栏封育的基础上,采取“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”、“围栏封育+松土补播+草种包衣”相结合的植被恢复模式,对比两种模式,“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”模式灌木条带的设置提高了退化草原抗风蚀能力<sup>[26]</sup>,施肥补充了土壤氮元素,提高土壤肥力进而促进植物生长,恢复草地生产力;“围栏封育+松土补播+草种包衣”模式通过补播增加适生植物种,改善植物群落结构配置,松土措施能激活土壤种子库,有助于提高群落丰富度。草地植被层的植株高度、密度是影响地表径流的重要因子,地表径流随着植被高度、密度的增加而降低<sup>[27]</sup>,综合植被恢复措施在恢复退化荒漠草原初级生产力和增加植物群落多样性的同时,径流量和侵蚀量均低于放牧天然草地,植被恢复措施对降低地表径流、减少水土流失也有一定作用。王猛等<sup>[28]</sup>研究也表明,与单纯封育相比,滇西北亚高山草甸退化草地实施封育的同时结合除杂、补播等措施,可更有效地改善草地质量和提高草地生产力。宋梅玲等<sup>[29]</sup>在不同草地管理措施对狼毒型退化草地群落结构和牧草品质的影响研究中也发现,与单独实施禁牧措施相比,“禁牧+防除狼毒”能明显提高草产量,“禁牧+刈割”处理能维持较高的群落多样性。相比于单个措施,综合措施的植被恢复效果较为明显,但针对不同草地类型、退化程度、生境条件、恢复目标,如何因地制宜的选择恢复管理措施、措施之间如何优化配置以期达到生态恢复最优策略还需进一步探讨。

通过不同植被恢复模式的植被特征、土壤水分、径流和侵蚀等主要指标的主成分分析结果,3种植被恢复模式中,“围栏封育+松土补播+草种包衣”(Ⅲ)恢复模式在保持水土资源、增加群落稳定性、提高草地生产力等方面的生态效益最好,其次为“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”(Ⅱ)。受不同草地类型、气候条件、土壤植被特征、退化程度以及恢复目标等因素的影响,每种单一的生态恢复措施都存在局限性,并且长期实施单一的恢复措施可能不会取得长期成效,相对于单一生态恢复措施,多种措施的综合应用不仅有利于提高草地生产力,保持水土资源,同时也有利于减少某种单个措施所带来的负面影响等缺点<sup>[30]</sup>,因此,综合措施具有更好的生态恢复效果。刘

延斌等<sup>[31]</sup>对甘肃省玛曲退化高寒草甸实施2a的围封、划破、施肥、补播和综合措施等5种不同生态恢复措施的草地生态系统健康状况评估结果表明,综合措施在CVOR及VOR(C为草地基况,V为活力,O为组织力,R为恢复力)生态系统健康评价模型的评价体系下均显著优于各单一处理措施,退化严重亟需生态恢复的草地,可通过实施综合生态恢复措施达到全面迅速恢复草地生态系统健康的目的。但另一方面,由于综合措施实施的经济成本往往较高,因此需要对综合措施的经济学和生态学双重效益进行进一步评估,才能因地制宜筛选出适宜的退化草原植被恢复模式。

## 4 结论

内蒙古四子王旗境内的退化荒漠草原采取“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”、“围栏封育+松土补播+草种包衣”植被恢复模式植物群落盖度、地上生物量显著增加,植被盖度和生物量的增加使裸露地面积较少,地表径流量和侵蚀量降低,有效控制了土壤侵蚀。两种植被恢复模式中,若以获得较高生产力为目标则可采用“围栏封育+灌木条带+施肥复壮”模式,若要增加群落多样性则以“围栏封育+松土补播+草种包衣”模式为宜。

运用主成分分析方法对不同植被恢复模式的水土保持生态效益进行评价,“围栏封育+松土补播+草种包衣”的植被恢复模式在增加群落稳定性、控制水土流失等方面生态效益最好,根据这一结果,荒漠草原水土流失治理与植被恢复应采取多种措施相结合的方式,提高退化草原的生态恢复效果,加快退化生态系统修复进程。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 卫智军. 中国荒漠草原生态系统研究[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the millennium ecosystem assessment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009,106(5):1305-1312.
- [3] 马治华,刘桂香,李景平,等. 内蒙古荒漠草原生态环境质量评价[J]. 中国草地学报,2007,29(6):17-21.
- [4] 李以康,杜岩功,张正芝,等. 种子补播恢复退化草地研究进展[J]. 草地学报,2017,25(6):1171-1177.
- [5] 张文军,张英俊,孙娟娟,等. 退化羊草草原改良研究进展[J]. 草地学报,2012,20(4):603-608.
- [6] 高志成,田佳妮,霍艳双,等. 切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响[J]. 生态学报,2017,37(11):3824-3829.

- [7] 张东杰,都耀庭. 禁牧封育对退化草地的改良效果[J]. 草原与草坪,2006,26(4):52-54.
- [8] 高天明,张瑞强,刘铁军,等. 不同灌溉量对退化草地的生态恢复作用[J]. 中国水利,2011(9):20-23.
- [9] 宝音贺希格,高福光,姚继明,等. 内蒙古退化草地的不同改良措施[J]. 畜牧与饲料科学,2011,32(3):38-41.
- [10] 荣浩,何京丽,珊丹,等. 锡林河流域退化草地植被恢复措施及水土保持效应研究[J]. 草原与草坪,2016,36(5):52-57.
- [11] Harris J A, Palmer J, Birch P. Land Restoration and Reclamation: Principles and Practice[M]. Singapore: Principles Hall, 1996.
- [12] 周瑶,马红彬,贾希洋,等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵典型草原土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2017,33(18):102-110.
- [13] 卓莉,曹鑫,陈晋,等. 锡林郭勒草原生态恢复工程效果的评价[J]. 地理学报,2007,62(5):471-480.
- [14] 杨婷婷,吴新宏,李鹏,等. 草原沙化治理工程生态效益快速评价体系研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):119-122.
- [15] 荣浩,何京丽,张欣,等. 荒漠草原不同植被恢复模式地上生物量与土壤水分的关系[J]. 草原与草坪,2018,38(5):71-76.
- [16] 卫智军,韩国栋,赵钢,等. 中国荒漠草原生态系统研究[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [17] Osunmadewa B A, Majdaldin R A, Csaplovics E, et al. Regional assessment of trends in vegetation change dynamics using principal component analysis[C] // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII, 2016.
- [18] 曾华星. 基于主成分分析的流域生态效益对比评价:以西南地区西林县 12 个流域为例[J]. 有色冶金设计与研究,2018,39(4):98-102.
- [19] 贺尧,苏芳莉,郭成久,等. 基于主成分分析法的煤矸石山植被水土保持功能评价[J]. 水土保持研究,2009,16(1):74-77.
- [20] 李宁宁,赵雨森. 基于 DEA 的黑土地水土保持综合效益评价研究:以黑龙江省为例[J]. 中国农学通报,2014,30(34):178-181.
- [21] Grace J B. The factors controlling species density in herbaceous plant communities: an assessment[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution & Systematics, 1999,2(1):1-28.
- [22] 蒋德明,苗仁辉,押田敏雄,等. 封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(1):40-46.
- [23] 刘凤婵,李红丽,董智,等. 封育对退化草原植被恢复及土壤理化性质影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学,2012,10(5):116-122.
- [24] 葛庆征,魏斌,张灵菲,等. 草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响[J]. 草业科学,2012,29(10):1517-1520.
- [25] 唐华俊,辛晓平,李凌浩,等. 北方草甸退化草地治理技术与示范[J]. 生态学报,2016,36(22):7034-7039.
- [26] 薛晶,侯占峰,刘海洋,等. 草原灌木带空气动力学粗糙度研究[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(6):253-256.
- [27] 苗百岭,梁存柱,王伟,等. 植被退化对典型草原地表径流的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(2):10-14.
- [28] 王猛,袁福锦,吴文荣,等. 封育对滇西北亚高山草甸群落及土壤的影响[J]. 草原与草坪,2017,37(2):69-74.
- [29] 宋梅玲,王玉琴,鲍根生,等. 不同草地管理措施对狼毒型退化草地群落结构及牧草品质的影响[J]. 草业科学,2018,35(10):2318-2326.
- [30] 金荣. 退化草地恢复研究进展[J]. 内蒙古林业调查设计,2018,41(5):61-64.
- [31] 刘延斌,张典业,张永超,等. 不同管理措施下高寒退化草地恢复效果评估[J]. 农业工程学报,2016,32(24):268-275.

(上接第 294 页)

- [15] 郑志伟,胡莲,邹曦,等. 汉丰湖富营养化综合评价与水体环境容量分析[J]. 水生态学杂志,2014,35(5):22-27.
- [16] 王子轩,逢勇,罗缙,等. 淀山湖流域平原河网水环境容量及控制断面水质达标方案研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):61-65.
- [17] 范丽丽,沙海飞,逢勇. 太湖湖体水环境容量计算[J]. 湖泊科学,2012,24(5):693-697.
- [18] 金国花,谢冬明,邓红兵,等. 鄱阳湖水文特征及湖泊纳污能力季节性变化分析[J]. 江西农业大学学报,2011,33(2):388-393.
- [19] 张萌,祝国荣,周慙,等. 仙女湖富营养化特征与水环境容量核算[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(8):1395-1404.
- [20] 白维东,亢小云,范金城,等. 宁夏阅海湖水水质综合评估[J]. 宁夏农林科技,2012,53(2):57-60.
- [21] 李斌,白维东,杨永宇,等. 阅海湖水环境因子时空分布特征及水环境综合评价[J]. 宁夏农林科技,2016,57(8):40-42,63.
- [22] 胡胜华,王硕,史诗乐,等. 武汉北太子湖水环境容量研究[J]. 绿色科技,2018(20):76-79,83.
- [23] 唐文秀. 汾河流域水环境承载力的研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [24] 江明,曾维,余健,等. 白潭湖水水质及其水环境容量分析[J]. 工业安全与环保,2016,42(4):81-84.