

塔里木河下游土壤种子库的季节差异分析

徐海量¹, 叶茂², 李吉枚¹, 王增如¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 以因不合理的水土资源开发而出现严重生态退化的典型区——塔里木河下游为研究区, 通过在塔里木河下游开展的土壤种子库实验, 分析了塔里木河下游土壤种子库的基本特征和种子库密度、物种组成上的季节差异, 并从土壤种子库的角度探讨了塔里木河下游生态恢复的可行性。(1) 塔里木河下游土壤种子库的季节差异较大, 如果排除放牧的影响, 3 月份土壤种子库的密度和物种丰富度总体上要小于 8 月份的土壤种子库;(2) 从物种组成上看, 3 月份物种组成以一年生草本占优势, 而胡杨和柽柳的种子基本上都出现在 8 月份的土壤种子库中;(3) 随塔里木河下游地上植被群落退化程度的加重, 种子库的密度和物种数均呈现明显的下降趋势;(4) 鉴于土壤种子库无论在物种还是密度上均要远丰富于地上植被群落的事实, 认为通过激活土壤种子库来实现下游生态的局部恢复在理论上是可行的。考虑到主要建群植物的生态恢复, 建议今后的输水时间应该选择在 8 月到 11 月之间。

关键词: 土壤种子库; 季节动态; 物种组成; 种子密度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)03-0017-06

中图分类号: S722.1+9

Seasonal Dynamics of Soil Seed Bank in the Lower Reaches of Tarim River

XU Hai-liang¹, YE Mao², LI Ji-mei¹, WANG Zeng-ru¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;
2. School of Geosciences, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: The typical severely degraded regions due to irrational utilization of water and land in the lower reaches of Tarim River were chosen as a study area. By using the germination method in the experiment on germination of soil seed bank, the dynamics of basic characteristics, density, and species of soil seed bank were analyzed. Vegetation restoration in the areas was also discussed in terms of potential role of the soil seed bank. Results show that without taking the effect of graze into account, seasonal dynamics of the soil seed bank is quite obvious and density and species abundance of the seed bank in March is lower than that in August. In terms of species composition, annual herbaceous plant is dominant in March and the seeds of *Populus euphratica* Oliv and *Tamarix* L almost appear in August. With the aggravated degradation, density and species abundance of the soil seed bank decrease significantly. To activate the soil seed bank is feasible theoretically for vegetation restoration in the lower reaches of Tarim River, for density and species abundance of soil seed bank is further larger than those of standing vegetation. Taking account of vegetation restoration and regeneration, our study suggests that the best time for water transferring should be from August to November.

Keywords: soil seed bank; seasonal dynamics; species composition; density of soil seed bank

土壤种子库是指存在于土壤表层凋落物和土壤中全部存活种子的总和^[1]。它是植物群落生活史的一个重要阶段, 又被称为潜种群阶段^[2]。鉴于土壤种子库对生态系统的恢复和未来植被的构成至关重要,

是植物群落更新发展的重要基础之一, 在群落的保护和恢复中起着重要的作用^[3-4], 因此近十几年来一直是种群生态学和恢复生态学的研究热点之一^[5-8]。而作为新疆乃至全国生态环境最脆弱的地区之一, 塔

里木河下游的生态问题引起了国内外许多学者的关注,并且在许多领域开展了卓有成效的研究工作,但涉及土壤种子库的研究工作却非常少。本文通过对比 2005 年 3 月和 8 月开展的土壤种子库的萌发实验,试图从塔里木河下游生态恢复的角度探讨土壤种子库的基本特征,目的是为即将在塔里木河下游开展的大规模生态恢复工程提供理论指导和决策依据。

1 研究区概况

研究区位于塔里木河下游大西海子至台特玛湖间,地理坐标介于东经 87.5636° — 88.4583° ,北纬 39.5° — 40.5869° 间,是新疆乃至中国生态环境最为脆弱的地区之一。该区属暖温带荒漠干旱气候,这里降水稀少,多年平均降水量仅为 20~50 mm;而年平均蒸发量(潜势)却高达 2 500~3 000 mm,在干旱荒漠气候的控制下,该地区的地带性植被是温性灌木和半灌木。但由于有河水和地下水补给,河漫滩及两岸的低阶地发育着大面积以胡杨为主要建群种的荒漠河岸林植被群落。近 50 a 来,由于人类不合理的水

土资源开发,造成塔里木河下游出现了极其严重的生态退化问题。特别是下游下段的天然植被在经历了 30 多年干旱、高温和风沙等多重胁迫后,天然植被大面积衰败和死亡,2000 年的调查显示,除胡杨(*Populus euphratica*)和怪柳(*Tamarix* sp.)生长在垂死的边缘外,仅在局部低洼湿地和临时性河道旁可以发现一些长势不佳的灌木和盐生草本植物。

为了研究方便,我们选择塔里木河下游 4 个典型断面 C、E、G、H 断面,它们分别位于塔里木河下游的英苏、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻。从现存植被和枯死的残留植被看这 4 个断面基本上属于一个群落类型,即乔木层皆以胡杨为主,灌木主要有怪柳和铃铛刺(*Halimodendron halodendron*),草本植物有芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等,但是由于河道干涸时间的不同,这 4 个断面植被退化的程度依次加重,其中在 H 断面以下基本上为寸草不生的流沙地(详见表 1)。

表 1 塔里木河下游四个典型断面基本状况

| 监测断面 | 距水库距离/km | 样地数 | 植被盖度/% | 胡杨冠幅/ m^2 | 多样性指数 | |
|------|----------|-----|--------|-------------|-------------------|-------------------|
| | | | | | Simpson | Margalef |
| C | 61 | 5 | 8~12 | 2.0~6.0 | 0.588 ± 0.228 | 0.818 ± 0.403 |
| E | 118 | 6 | 7~13 | 1.0~3.0 | 0.296 ± 0.146 | 0.606 ± 0.206 |
| G | 205 | 5 | 3~10 | 0.5~3.3 | 0.227 ± 0.028 | 0.283 ± 0.273 |
| H | 301 | 3 | 1~3 | 0.5~1.3 | 0.183 ± 0.091 | 0.221 ± 0.088 |

2 实验材料与方法

2.1 采样时间的选择

自 2000 年开始的以环境保护和生态修复为目的,塔里木河下游生态输水工程已连续开展了 7 a,分 8 次将 $2.21 \times 10^9 m^3$ 生态水输送到塔里木河下游。随着流域水文过程完整性的恢复,沿河一定区域的地下水水位和天然植被出现了明显响应。从下游河道的过水时间看(图 1),主要集中在 4—6 月和 8—11 月,分别占总过水时间的 39.65% 和 46.51%,而整个下游全线过水的时间也几乎完全在这两个时间段。同时,考虑到塔里木河下游主要建群植被的落种期在 8—10 月,而 3 月土壤种子库种子还未经过夏季萌发,土壤种子库包括了短暂土壤种子库和持久土壤种子库,因此多被国内外学者选做种子萌发的季节^[3-19]。总之,综合考虑理论与恢复实践的可行性后选择了这两个时间段作为土壤种子库的种子萌发时间。

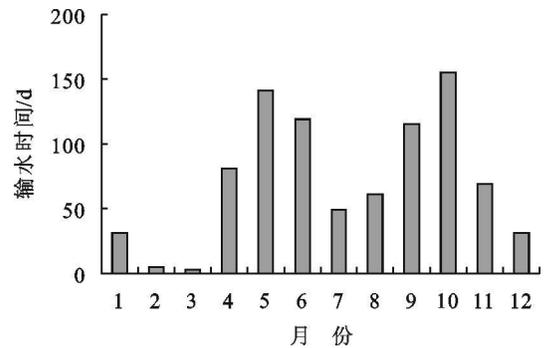


图 1 塔里木河下游河道过水时间统计

2.2 土壤种子库萌发

在塔里木河下游选取不同监测断面沿垂直河道 100~200 m 的距离上布设监测样地并进行长期的地表植被监测^[14]。据塔里木河下游天然植被的物候特点,分别于 2005 年 3 月底和 8 月初进行土壤种子库取样,在每个 $50 m \times 50 m$ 的样地内随机取土样 10 个,每个取样点大小 $40 cm \times 40 cm$,分别取 0—2,

2—5, 6—10 和 11—30 cm 4 个深度的土样, 装袋带回位于塔里木河下游 34 团的试验室供试。将同一样地中土层土样混合, 用土壤筛过筛, 将筛取的土样充分混匀, 然后平铺到预先制成的 10 cm × 10 cm × 10 cm 的生长实验箱内。

为了保证幼苗能有足够的营养, 箱内预先铺设约 2 cm 厚的蛭石作为基质, 考虑到胡杨、柽柳等植物的种子一般在土层 2 cm 以下上胚轴难以破土萌发, 因此铺设在蛭石上的土样厚度均控制在 3 cm 以内。每天适时补充水分以保持箱内的湿润, 混合土样在萌发时重复 6 次, 定时统计, 并请植物分类学专家进行幼苗鉴定。

种子萌发实验约从 3 月 30 日至 7 月 30 日和 8 月 5 日至 11 月 10 日结束。

2.3 数据处理

利用单因素方差分析 (one way ANOVA) 的方法计算各断面间种子库密度的差异 (Goubitz, 2004), 采取配对样本 T 检验的方法进行春季 (3 月份) 和秋季 (8 月份) 种子库密度的差异, 计算均在 SPSS 统计软件上进行。

依据《中国植物志》《新疆植物志》和笔者长期在塔里木河下游开展的植被监测资料, 确定物种的名称、生活型、生长周期、本地或外地种等。

种子库的密度、多样性指数及种子库与地表植被的相似性等均是先计算每个培养箱的结果, 再计算每个样地的平均值和标准差, 断面值为样地结果取平均。

3 结果与分析

3.1 地表植被的退化现状

自 1972 年塔里木河下游大西海子水库建成后, 其下 367 km 河道开始断流, 沿河生长的荒漠河岸林植被群落因无法得到正常生长和繁衍所必须的水分条件, 而出现严重的退化现象, 主要表现为植被盖度普遍偏低, 目测估计的 19 个植被样地的盖度均小于 15%, 同时植被的种类稀少, 从 C 断面开始一般样地内活植物物种数均少于 5 种 (50 m × 50 m), 到 H 断面存活的植物只有胡杨和柽柳, 而物种多样性指数低, 并且从 C 到 H 断面呈现逐渐递减的趋势, 从胡杨林的年龄结构看, 几乎全为过熟林。调查样地基本上没有发现胸径在 10 cm 以下的中幼龄活胡杨, 其长势极为衰败, 普遍存在枯梢、枯枝等现象, 而这点可以从胡杨冠幅的变化上得到反映 (表 1)。这些生态特征表明, 该区生态系统的退化已经达到了一种极为严重的地步^[14-15]。

3.2 土壤种子库密度的季节差异

种子库密度是指单位面积有活力种子的总和^[8-9], 对于判断一个地区生态恢复的潜力有重要的指示作用。从萌发实验看 (表 2), 塔里木河下游土壤种子库的密度基本在 150~ 2 300 粒/m² 之间, 而表层 0—5 cm 的种子库密度则只有 140~ 2 200。

表 2 塔里木河下游种子库密度的季节检验

| 断面 | 春粒/m ² | 秋粒/m ² | 自由度 | T | 显著性水平 |
|----|-------------------|-------------------|-----|---------|-------|
| C | 2012+ 409 | 1152+ 356 | 9 | 9.774 | 0.000 |
| E | 684+ 516 | 1615+ 475 | 11 | 7.751 | 0.000 |
| G | 300+ 158 | 973+ 338 | 9 | - 4.854 | 0.001 |
| H | 250+ 70 | 779+ 183 | 5 | - 4.941 | 0.004 |

从 3 月和 8 月两次萌发密度的对比检验结果看, 塔里木河下游土壤种子库春、秋季的季节差异较大, 表明种子库的季节动态明显, 而从表 2 对这 4 个断面分别在春秋两季配对的 T 检验结果看, 其显著性水平均 < 0.01 水平, 说明这一结果从生物统计的角度是成立的。从春、秋两季开展的土壤种子库萌发的实验结果看, 塔里木河下游这 4 个典型断面, 除 C 断面 8 月份种子库密度低于 3 月份以外, 其余 3 个断面的种子库密度均为 8 月份高, 特别是退化较为严重的 G, H 断面 8 月份种子库密度比 3 月份要分别高 224% 和 212%, 从 4 个断面的平均值看, 3 月份种子库密度的平均值为 817 粒/m², 而 8 月份种子库密度的平均值为 1 130 粒/m², 同时考虑到在这 4 个断面中 C 断面是当地惟一的夏季长期放牧的断面, 在开展地表调查时, 常常发现春天长势较好的一片草地秋季却已被严重啃食, 而国内外许多研究均表明动物的采食对种子库的影响较大, 因此排除这一因素, 我们认为塔里木河下游 8 月份种子库密度总体要高于 3 月份。

从表 3 春、秋两季的季节性分析看, 断面间的偏差平方和要明显大于断面内的偏差平方和, 表明不同断面间种子库密度的差异要大于断面内样地间种子库密度的差异, 这也说明退化程度的差异是造成该区土壤种子库空间差异的主因; 同时, 随着退化程度的加重, 土壤中有活力种子的数量则呈明显下降的趋势 (表 2)。在 C, E, G 断面随着地上植被群落退化程度的不断加重, 种子库密度从 2 012 粒/m² 分别降为 684, 300 和 250 粒/m²。虽然 8 月份种子库密度稍有差异, 但是总体看呈现一个下降的趋势, 表明地上植被群落退化程度的差异对土壤中有萌发活力的种子数量有明显的影响。

表 3 春秋季不同断面种子库密度的显著性检验

| 项 目 | | 偏差平方和 | 自由度 | 均差 | <i>F</i> | Sig. |
|-----|-----|----------------|-----|---------------|----------|-------|
| 春季 | 断面间 | 9 643 285.300 | 3 | 3 214 428.433 | 40.746 | 0.000 |
| | 断面内 | 1 104 441.200 | 14 | 78 888.657 | | |
| | 总 和 | 10 747 726.500 | 17 | | | |
| 秋季 | 断面间 | 2 873 896.411 | 3 | 957 965.470 | 16.637 | 0.000 |
| | 断面内 | 806 125.867 | 14 | 57 580.419 | | |
| | 总 和 | 3 680 022.278 | 17 | | | |

3.3 土壤种子库物种组成的季节差异

塔里木河下游由于长期的断流,因此植被的种类比较单一(如图 2 所示)。在所选的 4 个典型断面,在各断面 50 m × 50 m 的样地内地上植被的种类非常少,甚至退化程度最轻的 C 断面平均物种数也仅为 3.3 种/2 500 m²,而退化最严重的 G, H 断面地上植物的种类甚至均为 1 种/2 500 m²,表明该区地表植被的退化已达到极为严重的地步。从土壤种子库的物种组成看表现出两个明显的变化特点。(1) 不论是 3 月还是 8 月土壤种子库的物种组成均较地表植被要丰富的多(如 H 断面)。地上植被物种数的平均值为 1,而 3 月和 8 月萌发出来的物种数的平均值分别是 1.6 和 5.3 种/2 500 m²,说明作为潜种群的土壤种子库在物种多样性的恢复上具备了比地上植被丰富的物种储备。(2) 土壤种子库在物种组成上均受地上植被退化的影响,随退化程度的加剧,物种组成上呈现下降的趋势。从种子库物种组成的季节动态看,也表现出两个明显的特点。① 如果排除地表放牧的影响,8 月份土壤种子库的物种组成要比 3 月份高。例如 H 断面,3 月份仅有 1 种植物萌发,而 8 月份种子库的物种数增加的 3 种;② 种类组成上差异明显,在 3 月份开展的种子萌发实验上,一年生草本植物和多年生草本所占的比重较高。例如 C 断面,一年生草本占种子库密度的 65%,而下游主要的建群植物胡杨和柽柳的种子基本没有出现,这主要是

它们的种子存活时间较短,对种子库的贡献较小;但是在 8 月份开展的种子库实验上,乔木和灌木的比重大幅提高,这与胡杨、柽柳等植物的种子雨在 8 月份有较大的关系,而一年生草本植物的比重则有明显的下降,这是否与 2005 年输水时间较短,许多草本植物还没有完成种子成熟和落种等因素有关尚需进一步研究。但是从塔里木河下游主要建群植物生态恢复的角度考虑,8 月份种子库物种组成与下游地上植被群落更为接近,而通过人为给水的方式激活这一时段的种子库更有利于当地的生态恢复,则是今后开展生态恢复工作所需要重点关注的。

从土壤种子库在 3 月和 8 月两季萌发植物的物种数的方差分析结果(表 4)看,与种子库密度的结果类似,萌发的种类数在不同断面间的差异也满足显著水平。

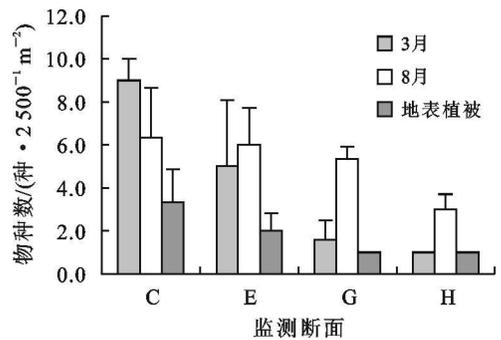


图 2 塔里木河下游不同断面的物种变化

表 4 塔里木河下游不同断面种子库和地上植被物种数方差分析

| 项 目 | | 偏差平方和 | 自由度 | 均 差 | <i>F</i> | 显著性水平 |
|--------|-----|---------|-----|--------|----------|-------|
| 3 月种子库 | 组 间 | 175.298 | 3 | 58.433 | 23.477 | 0.000 |
| | 组 内 | 37.333 | 15 | 2.489 | | |
| | 合 计 | 212.632 | 18 | | | |
| 8 月种子库 | 组 间 | 42.456 | 3 | 14.152 | 6.775 | 0.004 |
| | 组 内 | 31.333 | 15 | 2.089 | | |
| | 合 计 | 73.789 | 18 | | | |

从 3 月份断面间的 *F* 值为 23.477,而 8 月份的 *F* 值为 6.775;同时显著性水平也是 3 月份的要好,

说明春季不同退化程度的断面间种子库的物种数的差异更显著。而从偏差平方和的结果看,春、秋两季

的组内偏差平方和差异不大,而组间的偏差平方和变动较明显,表明在春季,塔里木河下游土壤种子库中的物种数在不同断面间的差异较大,而到了秋季在该区主要植物的落种期,断面间的物种差异有减少的趋势,而考虑到春季种子库中的物种更多的是一些持久种子库,因此,可以认为环境条件的恶劣和植被群落退化程度的加重更多地影响到持久种子库的数量和组成。

4 结果与讨论

土壤种子库的组成和大小随时间呈现有规律的变化,尤其是其物种组成和数量具有季节动态^[20-28]。因为较多物种的种子散布后,在土壤中存留较短的时间就萌发了,而另外一些物种的种子除有一部分萌发外,另有一部分仍留存在土壤中,处于休眠状态。由于塔里木河下游极端退化的环境条件和严重的生态退化,该区土壤种子库在季节动态上具有其特殊性,归纳为以下3点。(1)由于主要建群植物胡杨、柽柳的种子雨较密集,种子寿命短,因此造成塔里木河下游种子库密度和物种组成上的季节差异较明显。如果排除了放牧等的影响,8月份种子库的密度平均值为1130粒/m²要高于3月份种子库密度的平均值817粒/m²,在物种组成上8月份的种子库物种组成也比3月份要丰富,特别是主要建群植物胡杨和柽柳等种子在春季的萌发实验上没有出现,而在8月份的萌发实验上集中出现。另外,3月份出现的物种以一年生草本和个别物种的多年生草本为主,因此从恢复塔里木河下游生态恢复的角度考虑,生态输水的时间应该更多地考虑在秋季开展。(2)无论是3月还是8月份开展的种子库实验均表现出明显的随着地上植被生态退化程度的加重,种子库密度明显减少和物种数的显著降低,因此从激活土壤种子库来实现生态恢复的工程实践上应该把宝贵的水资源更多地应用在下流上段植被退化程度较轻的区域。(3)极端干旱的环境条件和严重的生态退化,造成塔里木河下游土壤种子库的种子库密度较低,不仅低于一般荒漠草地的种子库密度,而且与Guo等在南美Chihuahuan沙漠,赵丽娅等在科尔沁沙地和闫巧玲等研究的沙丘种子库密度相比都明显偏小。如Guo等在南美Chihuahuan沙漠的计算的种子库密度为21000粒/m²,但是土壤种子库中无论是活力的种子数还是物种的丰富度均要远高于下游地上植被群落,因此,如果采取合适的措施,通过激活土壤中的种子库来实现下游生态的恢复至少在理论上是可行的。

[参 考 文 献]

- [1] Roberts H A. Seed banks in the soils[J]. *Advances in Applied Biology*, 1981, 6: 1—55.
- [2] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库研究的进展及若干问题[J]. *植物生态报*, 2003, 27(4): 552—560.
- [3] Davies A, Waite S. The Persistence of calcgeous grassland species in the soil seed bank under developing and established scrub[J]. *Plant Ecology*, 1998, 136: 27—39.
- [4] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats[J]. *Ecology*, 1979, 67: 893—921.
- [5] Guo Q F, Rundel P W, Goodall D W. Structure of desert seed banks: Comparisons across four North American desert sites[J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42: 1—14.
- [6] Yan Q L, Liu Zh M, Zhu J. Structure, pattern and mechanisms of formation of seed banks in sand dune systems in northeastern Inner Mongolia. China[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277: 175—184.
- [7] Price M V, Joyner J W. What resources are available to desert granivores: seed rain or soil seed bank[J]. *Ecology*, 1997, 78: 764—73.
- [8] Henderson C, Petersen K, Redak R. Spatial and temporal patterns in the seed bank and vegetation of a desert grassland community[J]. *Journal of Ecology*, 1988, 76(3): 717—728.
- [9] Kemp P R. Seed bank and vegetation processes in desert [C]// *Ecology of Soil Seed Bank*, San Diego: Academic Press, 1989: 257—282.
- [10] Jessie E, Andraw H. Seedling emergence from seed banks of tidal freshwater wetlands: Response to inundation and sedimentation[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 78(3): 243—254.
- [11] Bossuyt B, Heyn M. Seed bank and vegetation composition of forest stands of varying age in Central Belgium: Consequences for regeneration of ancient forest vegetation[J]. *Plant Ecology*, 2002, 162: 33—48.
- [12] Vanessa M, David M, John S. Importance of the seed bank for population viability and population monitoring in a threatened wetland herb[J]. *Biological Conservation*, 2005, 124: 425—436.
- [13] Norbert Holzel, Annette Otte. Inter annual variation in the soil seed bank of flood meadows over two years with different flooding patterns[J]. *Plant Ecology*, 2004, 174: 279—291.
- [14] 徐海量, 陈亚宁. 塔里木河下游生态输水对植被和地下水的影响[J]. *环境科学*, 2003, 4(24): 18—22.

- [15] Xu H L. Effect of Groundwater level on the vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim river [C] // The Proceedings of the China Association for Science and Technology. 2006: 2(3): 86—93.
- [16] 曾彦军, 王彦荣, 南志标. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1457—146.
- [17] 赵丽娅, 李锋瑞. 草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1745—1756.
- [18] 赵丽娅, 李兆华, 李锋瑞, 等. 科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3204—3211.
- [19] Ren J, Tao L, Lin X M. Effect of water supply on seed germination of soil seed bank in desert vegetation[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 44(1): 124—126.
- [20] 闫巧玲, 刘志民. 持久土壤种子库研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 22(8): 948—952.
- [21] Leck, M A, Leck C F. A ten year seed bank study of old field succession in central New Jersey[J]. Journal of the Torrey Botanical Society, 1998, 125: 11—132.
- [22] Coffin D P, Lauenroth W K. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semi arid grass land[J]. American Journal of Botany, 1989, 6: 53—58.
- [23] Yan Q L, Liu Zh M, Zhu J. Structure, pattern and mechanisms of formation of seed banks in sand dune systems in northeastern Inner Mongolia. China[J]. Plant and Soil, 2005, 277: 175—184.
- [24] Major J, Pyott W T. Buried viable seeds in temperate forest[C] // White J D(ed). The Population Structure of Vegetation. Dordrecht, the Netherlands: Junle Publishers, 1966, 13: 253—282.
- [25] Whipple S A. The relationship of buried, germinating seeds to vegetation in an old growth Colorado subalpine forest[J]. Canadian Journal of Botany, 1978, 56: 1505—1509.
- [26] Caballero I, Olano J M, Loidi J. Seed bank structure along a semi arid gypsum gradient in Central Spain [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(2): 287—299.
- [27] Connor T G, Pickett G A. The influence of grazing on seed production and seed bank of some African savanna grasslands[J]. Journal of Applied Ecology, 1992, (29): 247—260.
- [28] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats [J]. Journal of Ecology, 1995(6): 893—921.

(上接第 16 页)

土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维与 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、土壤有机碳、容重的相关系数均达到了极显著水平, 均能作为评价植被恢复土壤结构稳定性的指标; 而团聚体平均重量直径与土壤有机碳含量、容重相关性不显著, 只与 $> 5 \text{ mm}$ 团聚体含量和 $> 0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量有极显著正相关关系, 仅可作为大团聚体含量的指标。因此, 土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维比团聚体平均重量直径更适合作为描述植被恢复下土壤结构稳定性变化的指标。

[参 考 文 献]

- [1] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [2] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion loess [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28: 337—351.
- [3] Van Bavel C H M. Mean weight diameter of soil aggregate as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1949, 14: 20—23.
- [4] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896—1899.
- [5] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 55—60.
- [6] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 39—46.
- [7] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700—706.
- [8] 史衍玺. 人为开垦加速侵蚀下土壤质量演变及其机理研究[D]. 杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1998.
- [9] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1—8.
- [10] 吕殿青, 邵明安, 王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报, 2003(3): 110—115.
- [11] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter. II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1042—1049.
- [12] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution[C] // Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 2002: 317—328.