

文章编号:1000-694X(2009)05-0845-08

# 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展

李新荣, 张志山, 王新平, 刘立超, 黄磊

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠研究试验国家站, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 干旱区约占地球陆表面积的 40% 以上, 所支撑的复杂多样的生态系统是全球陆地生态系统的重要组成, 水是干旱区诸多生态系统过程的驱动力和关键的非生物限制因子。生态水文学作为新兴的交叉学科, 为客观、全面地诠释干旱区植被与土壤系统相互作用与反馈机理提供了新的理念和途径, 同时, 也为干旱区以植被建设为主的生态恢复实践提供了理论基础。以沙坡头沙漠研究试验站在腾格里沙漠东南缘荒漠化草原和草原化荒漠过渡带的长期定位监测研究为例, 分析、综述了我国在干旱区生态水文学研究领域所取得的主要成绩和相关进展, 重点讨论了沙地植被从组成、结构和功能群演变等多层次上对土壤生态水文过程的响应, 以及植被对土壤环境和水循环的长期反馈作用和调控机理; 将生物土壤结皮首次作为影响植被-土壤系统水文过程的重要环节来考虑, 对其发挥的生态水文功能的相关研究进行了总结; 归纳了基于水量平衡的干旱区生态恢复理论模式及其在实践中的应用。

**关键词:** 土壤水分的植被调控; 生态水文过程; 生物土壤结皮; 生态修复

**中图分类号:** Q948

**文献标识码:** A

20 世纪 90 年代诞生的生态水文学使人们已经认识到它在解决干旱区水文过程等系列科学问题中的重要性<sup>[1-2]</sup>。由国际水文科学协会 (IAHS) 举办的第 7 届国际水文科学大会 (2005 年) 特别强调了水文学与生态学交叉研究的重要意义, 以及相关著作的相继问世<sup>[1-3]</sup> 和国际著名出版公司 John Wiley & Sons 于 2008 年出版的国际上第一份生态水文杂志 *Ecohydrology* 有力地推动了生态水文学的发展。目前, 生态水文学在水循环的生态过程机理和水资源管理方面的研究显示了其学科交叉的优越性。针对干旱区, 揭示植物在水分胁迫下的群落组成结构、分布格局与演变过程是该区生态水文科学研究的焦点问题之一, 而长时间尺度上, 研究区域群落演替过程与气候和水环境变化之间的关系在生态水文学研究中尤为重要<sup>[4]</sup>。尽管从学科发展来看, 生态水文是一门新兴的交叉学科, 但就其许多相关实质科学问题而言, 在干旱区生态修复的实践中早已引起了国内外的广泛关注。

位于腾格里沙漠东南缘, 始建于 20 世纪 50 年代中期的沙坡头人工固沙植被体系确保了包兰铁路在该地区半个世纪的畅通无阻, 成为全球交通干线沙漠治理与生态恢复的成功范式<sup>[5-7]</sup> 和遵循沙地水循环规律、符合植被地带性分布规律的植被建设的例证<sup>[8]</sup>。从“实践到理论, 再用理论指导实践”的过程基本上概括了我国干旱区生态水文学的研究和发

展历史, 相关研究进展和业已取得的成果为推动生态水文学的深入研究和进一步发展奠定了重要的基础, 同样, 在实践中系统地认知生态水文过程的基本特征和机理则是干旱区实施生态工程建设和实现区域生态恢复的重要前提。笔者基于中国科学院沙坡头沙漠研究试验站在腾格里沙漠东南缘荒漠化草原和草原化荒漠过渡带的长期定位研究, 分析和综述了我国干旱区生态水文学研究所取得的主要成绩和相关进展, 并对未来的研究进行了讨论。

## 1 干旱区植被对土壤生态水文过程的响应与调控机理

水量平衡与水循环始终是干旱区植被建设所面临的核心科学问题, 并决定着植被的可持续发展和系统的稳定性。针对土壤-植被系统水循环过程及其植被调控机理的研究不仅是干旱区生态水文学研究的核心内容, 而且对我国西部生态环境建设也具有重要的实践指导意义。腾格里沙漠沙坡头地区无灌溉人工固沙植被体系与相邻天然植被系统 50 余年的长期定位观测为这些科学问题的研究提供了良好的平台<sup>[9-10]</sup>。近年来所取得的相关成果包括:

### 1.1 植被在组成、结构和功能群等方面对沙地水循环演变的响应特征

固定样地的长期连续监测表明, 在年降水小于

收稿日期: 2009-01-15; 改回日期: 2009-03-20

基金项目: 国家杰出青年基金 (40825001) 资助

作者简介: 李新荣 (1966-), 男, 甘肃武山人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区生态与水循环研究。Email: lxinrong@lzb.ac.cn

200 mm 的荒漠化草原地区,固沙植被对水分的利用使植被建立 9~10 a 后的土壤含水量(0~3 m)开始迅速下降(从植被建立前的 3%~3.5% 降至 1.5%),40 a 之后则稳定在较低的水平(1.2%);植被建立初期,土壤含水量无论是浅层(0~0.4 m)还是深层(0.4~3 m)含水量均与降水的分布显著相关,但植被建立 40 a 后浅层土壤持水能力增加 80%,水分有效性增加,并与降水的时间分布密切相关,而深层土壤含水量降低(从 4%~5% 降至 1%),并与降水的时间分布无显著相关性<sup>[11-12]</sup>。此外,土壤水分含量从浅层到深层显著降低,且该区地下水埋深大于 60 m,不能补给深根系灌木的需水。植被对上述土壤水分时空变异的响应表现在:固沙植被组成由优势灌木群落逐渐向隐花植物(蓝藻、荒漠藻、地衣和藓类)、一年生草本植物和浅根系半灌木为优势的群落演变(灌木的覆盖度从最高 25%~35% 降至 8%~10%,而草本植物覆盖度显著地增加),为植被进一步向荒漠化草原演变创造了生物定居与繁衍的生境,即植被在其组成、结构、生活型和功能群等多层次上的多样性和复杂性的自我调整提高了整个植被系统的水分利用率和有效性<sup>[9,13-15]</sup>,使植被趋于临近相同生物气候区天然植被的特征(随着固沙植被的演变,自然定居的草本植物种的丰富度显著地增加,草本植物成为植被系统生产力的主要贡献者)。

## 1.2 植被调控下沙地水循环重要环节的数量特征

利用系列大型 lysimeter 和水量平衡综合观测场的连续监测,确定了荒漠区不同类型与结构的植物群落冠层对降水的截留能力介于 0.7~1.1 mm 之间,发现植被冠层累计截留量与降水量、降水强度之间的统计关系符合指数方程变化特征,当降水量无穷大时截留量接近于常数,植被冠层截留率在 0.2~0.3 之间<sup>[16]</sup>。此外,确定了荒漠植被区降水入渗、水分再分配与地表覆被特征的关系,建立了入渗速率与降水强度以及降水量与累计入渗量之间关系模型<sup>[11,17]</sup>:

$$IR = 49.61 - 0.40RI + 0.46RT$$

$$(R = 0.4648 > R_c = 0.364, P = 0.05),$$

$$IA = -0.19 - 0.04RI + 0.60RT$$

$$(R = 0.889)$$

式中:IR 为入渗率(%);RI 为降水强度( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );IA 为入渗总量(mm)和 RT 为一次降水的总量。

利用覆盖油毡的蒸渗池观测了多年生长季的植

物蒸腾,以植物有效盖度和叶面积指数为纯量,对蒸渗池观测结果进行尺度转换。建立了不同植被覆被条件下的蒸散发(ET)与同期降水量(P)的经验关系:

油蒿(*Artemisia ordosica*)植被区

$$ET = 0.8003P + 5.8914, R^2 = 0.9035$$

柠条(*Caragana korshinskii*)区

$$ET = 0.80P + 10.0, R^2 = 0.953$$

流沙区

$$ET = 0.55P + 5.89, R^2 = 0.985$$

并以叶面积指数和有效盖度为基础,实现了对植物蒸腾水分利用从叶片水平到群落水平的尺度转换:

单位叶面积的日蒸腾量( $Tl, \text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  叶片)为:

$$Tl = (Ts \times A) / (C \times LAI)$$

式中: $Ts$  为土壤蒸发量; $C$  为有效盖度; $LAI$  为叶面积指数; $A$  为占地面积<sup>[18]</sup>。

## 1.3 植被-土壤系统水量平衡关系

长期观测表明,沙丘生境的地表蒸发量低于同期降水量的 77%,而固沙植被区生长季节的蒸散量却占同期降水量的 80% 以上,并在干旱年份沙层水分出现亏缺现象,其中油蒿与柠条群落平均蒸散速率分别为  $1.55 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $1.47 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;天然沙丘土壤深层渗漏量约占降水量的 10%~46% 左右,渗漏速率平均为  $0.63 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,年平均渗漏量 48 mm,此外,流沙区地表蒸发量较低,土壤剖面 3 m 深度内贮存的水分有限,土壤含水量始终保持在田间持水量的 51.8% 左右,约占年降水量 24%~27% 的水分不断下渗到沙层深处,无法被植物利用,这一观测在很大的程度上揭示了高大沙丘具有蓄水的功能,以及在低洼地出现范围较小沙漠湿地景观的原因。人工固沙植被的建立有效地利用这部分下渗的水资源,将部分渗漏损失水量转换成一定的生物量,减少土壤深层水分渗漏损失。地上地下干物质积累不断增加,使得区域资源贡献向最大化演变,生态环境质量得到改善,提高荒漠生态系统生产力<sup>[19-22]</sup>,但从另一方面来看,植被的建立彻底地改变了原来沙丘系统的水循环,使沙丘与其他系统如低洼湿地或草地的水分联系减弱。不合理的大范围沙地造林甚至会导致已有相邻的湿地萎缩或草地的退化。

## 1.4 固沙植物根系统对水分动态的地下生态学响应

生理生态学的研究结果认为,优势固沙灌木柠

条和半灌木油蒿对于干旱胁迫有着不同的适应对策。柠条以渗透调节为主,而油蒿以膨压调节为主,且油蒿的水分调节能力大于柠条。随木质化程度的增加,枝条的渗透调节能力逐渐增加,而维持膨压的能力和水分调节能力逐渐减小<sup>[18]</sup>。

固沙植被中植物根系分布趋于浅层化是受土壤干旱胁迫的结果<sup>[10,23]</sup>。在植物根系统中,直径 $\geq 1$  mm的根系(粗根)主要起输导水分及养分的作用,直径 $< 1$  mm的根系(细根)为吸收根,主要进行水分和营养物质的吸收。细根在土壤中的分布及其动态变化将影响到根系吸水速率,进而对基于根系分布特征的根系吸水模型模拟产生深远的影响。利用 Minirhizotrons 根系动态监测和小型 lysimeter 等控制实验研究表明,固沙植被中植物细根的生长动态表现为双峰型,细根的根长密度和根重密度随土壤深度而减小且呈指数形式递减,粗根的根长密度远远小于细根的根长密度。固沙植物的根系增幅(根长密度与根重密度)生长滞后于土壤水分含量峰值约 30 d 左右,当土壤含水量高于 2.75%,该区域植物无需庞大根系来维持其对水分需求,进而保证其地上生物量生产,根冠比往往较小。而当土壤含水量低于 2.75%时,植物因受水分胁迫需要较庞大的根系来维持足够水分的获得。因此,限制该地区荒漠植物正常生长的根系分布区土壤水分含量阈值为 2.75%<sup>[24-25]</sup>。这一研究提出了沙地植物根系对水分变化响应和所采取的生态适应对策,实验解释了干旱区植被地下生物量大比例分配的生态学机理。

### 1.5 植被促进土壤系统生态恢复的基本特征

利用空间取样代替时间的方法,以荒漠化草地因沙丘扩张导致地表覆沙/沙埋后经建立植被恢复过程为例,模拟预测了腾格里沙漠南缘地区植被-土壤系统的土壤生境特性的恢复过程和恢复速率。结果表明,在流动沙丘环境建立固沙植被 50 a 后,大多数表土层特性(参数)能够恢复到天然植被表土特性的 60%,其中粘粒百分含量、表土层含水量、表土与结皮的厚度和土壤容重恢复到天然植被这些土壤特性的水平需要 70~245 a 的时间(表 1),而土壤质地中的沙粒和粉粒百分含量、CaCO<sub>3</sub>、有机碳和电导度等土壤特性仅能恢复到天然植被的 20%~40%;在 50 a 的恢复期内土壤特性的恢复速度在恢复初期(1~15 a)快于恢复的后期(40~50 a)。恢复(达到模型曲线渐近线值 asymptote value 的 90%)最快的是 C/N 比率(18 a),需要时间最长的是土壤容

重(245 a)。针对土壤水分状况,则需要至少 120 a 才能恢复到天然植被的浅层土壤水分状况,尽管沙埋后生境经植被建设促进了表层土壤的持水能力,但 50 a 内仅能恢复到天然植被土壤持水能力的 79%,而对于一些土壤特性如沙粒和粉粒百分含量和有机碳含量等,在 50 a 以后的相当长的时间内即使发生最大可能的恢复,也不能达到天然植被土壤特性的水平。这一预测结果说明在极端干旱的荒漠地区土壤特性的生态恢复是一个十分漫长的过程,土壤生境一旦遭到破坏,即使人为促进的修复也是十分困难的,甚至一些特性的退化是不可逆的<sup>[6,26]</sup>。

表 1 土壤生境恢复过程中其理化特性随时间恢复的拟合曲线渐近线值、截距和恢复速率参数

Table 1 Intercepts, rate parameters and asymptote values of curves fitted to the recovery of soil physical, chemical characteristics of a chronosequence

土壤特性	截距	速率	渐近线值	90%的渐近线值	到达 90% 渐近线值的年限/a	恢复程度/%
沙粒	99.73	0.067	65.88	72.47	87.02	21
粘粒	0.00	0.002	89.53	80.58	77.88	100
粉粒	0.00	0.086	24.80	22.32	26.66	34
表层含水	1.61	0.018	3.89	3.50	119.32	100
持水力	9.03	0.042	19.11	17.20	54.34	79
结皮表土厚度	0.00	0.008	7.75	6.98	127.98	100
容重	1.53	0.002	1.54	0.15	244.89	100
pH 值	0.26	0.097	7.96	7.16	49.53	96
碳酸钙含量	0.00	0.048	2.61	2.35	47.95	26
全氮	0.04	0.050	1.77	1.59	89.53	85
有机碳	0.29	0.113	8.21	7.40	43.95	40
碳氮比	1.13	0.189	8.91	8.02	17.31	88
全钾	0.07	0.170	1.29	1.16	22.70	73
全磷	0.16	0.061	0.83	0.74	39.86	60
电导度	0.11	0.576	0.26	0.23	123.54	20
全盐	0.06	0.041	1.51	1.36	69.19	100

## 2 生物土壤结皮在植被-土壤系统恢复中的生态水文作用

作为干旱区土壤-植被系统的重要组成部分,生物土壤结皮(Biological soil crust),由蓝藻、荒漠藻、地衣、苔藓和细菌等相关生物体与土壤表面颗粒胶结形成的特殊复合体)对降水入渗的截留作用显著地改变降水入渗过程和土壤水分的再分配格局,在一定条件下可减少降水对深层土壤的有效补给。例如当次降水量 $< 10$  mm 时,地表发育良好的结皮可

使入渗深度局限在 20 cm 的土层以内。固沙植被中生物土壤结皮的水文物理特性具有典型的微地域差异性,且随着土壤含水率的变化表现出非线性特征。其既具有较强的保持水分的能力,同时当它的非饱和水力传导度在随土壤含水率降低递减至一定值时,出现回升并能够维持在一个较高的水平,这一点明显区别于流动沙丘<sup>[19,22,27-28]</sup>;生物土壤结皮能够改善土壤水分的有效性,对荒漠地区土壤微生境具有改善作用,其存在显著地改变了浅层土壤的水力特性,使土壤非饱和导水率的变化维持在相对平稳阶段,增强了土壤保持水分的能力,增大土壤孔隙度,提高水分有效性<sup>[19,29]</sup>,进而有利于所在生态系统的主要组分浅根系草本植物与小型土壤动物生存繁衍<sup>[12,30]</sup>。随着固沙植被的演替,水分和养分的表聚行为导致了植被系统的生物地球化学循环发生浅层化<sup>[14,31-32]</sup>。针对水循环演变过程的特点,生态修复过程中生物群落采取了以低等植物多样性恢复快于高等植物、土壤微小动物多样性高于大型土壤动物,且集中在土壤浅层的恢复和适应对策<sup>[12]</sup>。与国际上相关研究相比较,我国在温性荒漠生物土壤结皮生态水文功能方面的研究特点包括:

### 2.1 温性荒漠/沙漠地区生物土壤结皮的形成和演变对生态恢复的指示作用

与热荒漠(hot desert)和寒漠(cold desert)相比较,温性荒漠生物土壤结皮的分布以隐花植物种类丰富、结皮类型齐全和生态指示意义鲜明而著称<sup>[29]</sup>。在腾格里沙漠沙坡头地区表土质地组成中,粗粉粒含量和大气降尘在表土层的积累是结皮形成的重要物质基础,稳定的物理环境和微生物在表层土壤繁衍与隐花植物的拓殖,以及分泌物和根系统对粉粒物质的胶结作用是结皮形成的重要前提<sup>[31,33]</sup>。

生物土壤结皮在温性荒漠或沙丘固定过程中的拓殖发展包括蓝藻结皮、荒漠藻结皮、地衣和藻类混生结皮和藓类地衣混生结皮等重要的演替阶段<sup>[34]</sup>,而这种演变规律与表土层水分生境的改变密切相关。在干燥(含水量 $<0.5\%$ )、地表经常受到干扰的生境,生物土壤结皮多以极耐旱、抗干扰强的蓝藻结皮为主,成为长期的优势结皮类型;当以蓝藻为主结皮生境不再受到干扰的情况下,表土层的持水能力增加(含水量 $0.5\% \sim 0.8\%$ ),结皮的生物体组成中出现了多样的绿藻,并形成荒漠藻为优势的结皮,荒漠藻的进一步拓殖为地衣结皮的形成创造了适宜的

生境;地衣结皮的形成使荒漠生境趋于景观稳定状态,该阶段表土层对降水的拦截明显增加,将有限的降水保持在土壤浅层,土壤水分的时空分布的异质性为局部藓类植物的覆盖创造了条件,进而形成以藓类为优势的混生结皮(含水量 $>1\%$ ),而这些处在不同演替阶段的结皮,在植被-土壤系统中的生态与水文功能也各异。

生物土壤结皮不同的演替阶段与植被-土壤系统的恢复特征密切相关:结皮处在后期的演替阶段指示着植被-土壤系统处于良好的恢复和相对稳定的阶段,而如果植被-土壤系统中结皮所处在演替前期阶段意味着系统的许多不确定性,如抗干扰能力差和不稳定性,因此,温性荒漠生物土壤结皮的演替规律可以指示植被-土壤系统的恢复或退化进程,及荒漠草地的荒漠化发生、发展或逆转与恢复的趋势<sup>[29]</sup>。

### 2.2 生物土壤结皮对土壤水文过程的影响

生物土壤结皮对土壤水文过程的影响主要体现在对降水入渗、地表蒸发、凝结水捕获等水文过程重要环节的影响,对受水分胁迫的干旱区植被-土壤系统显得尤为重要。Li 等<sup>[11]</sup>、Li 等<sup>[17]</sup>和 Wang 等人<sup>[22]</sup>提出了生物土壤结皮对降水入渗的影响是取决于降水强度、区域的降水量和结皮层下土壤基质的理化性质以及隐花植物组成差异的综合评价观点,从而解释了国际上来自不同研究区的长期争论。

不同类型的生物土壤结皮对地表蒸发的影响不同,随着地衣结皮和藓类结皮的形成,结皮层和其下的亚土层增厚,土壤容重下降,土壤持水能力增加<sup>[26,35]</sup>,结皮土壤的持水能力依次是藓类结皮 $>$ 地衣结皮 $>$ 藻类结皮 $>$ 蓝藻结皮 $>$ 流沙土壤。室内蒸发法和野外观测表明,当待测土壤样品完全饱和后,有结皮的土样蒸发量均高于无结皮的土样,但是其蒸发过程却表现出明显的阶段性:在蒸发初阶段,即蒸发速率稳定阶段,生物土壤结皮的存在均有效地提高了蒸发,当处于蒸发速率下降阶段时,结皮的存在却抑制着蒸发<sup>[36-38]</sup>,这一发现很好地解释了生物土壤结皮具有较高的持水能力,且在降水事件发生后,它的存在促进了蒸发,尔后又开始对蒸发起到抑制作用,延长了水分在浅层土壤中的保持,尤其是当出现干旱胁迫时,结皮增加浅层土壤水分有效性的功能显得尤为重要,保证有限水分的维持对活动在浅层土壤的高等植物的萌发、定居和存活具有重要的意义<sup>[34,39-45]</sup>,也是驱动植被-土壤系统生物地球

化学循环浅层化的一个重要原因之一<sup>[10]</sup>。

此外,对结皮影响水文过程的另外一个重要环节,即在干旱区对凝结水的捕获均得到了不同区域研究者的肯定<sup>[46-47]</sup>。凝结水为结皮中的隐花植物和其他微小的生物体提供了珍贵的水资源,激活了生物体的活性,开始短时间的光合作用,以及固氮过程(如蓝藻和一些地衣种)。生物土壤结皮表面凝结水形成量随着结皮的发育程度呈现增长趋势,物理结皮是生物土壤结皮形成的最初期阶段,由于大气降尘对土壤细粒物质的贡献的作用,使其粘粒和粉粒含量大大高于流沙,因此,在其表面形成的凝结水高于流沙。而且,由于生物土壤结皮粘附大量微生物有机组分,使得苔藓与藻类结皮表面凝结水量大幅度增加,日均值高达 0.15 mm 左右,最大值接近 0.5 mm · d<sup>-1</sup>。结皮对干旱区,特别是年降水 < 200 mm 沙区生态与水文过程的重要影响在于促使了沙地土壤有效水分含量的浅层化,这一影响深刻地改变了沙地原来的水循环,影响了沙地植被的组成和格局<sup>[23]</sup>,较好地揭示了我国沙区人工植被演变的基本规律,即向特定生物气候区地带性植被的演替<sup>[9]</sup>。

### 2.3 生物土壤结皮在温带荒漠植被-土壤系统的“源-汇”关系中的作用

大多数荒漠生态系统是由非生物因素调控和胁迫的系统,特别是因受水分的限制,地表不可能支撑大面积、相对均一而连续分布的高等植物群落的覆盖,植物群落斑块状的分布为生物土壤结皮的拓殖和覆盖提供了空间和适宜的生态位,使生物土壤结皮的覆盖在干旱区占地表面积的 40%。在小尺度范围内,植物斑块间的水分运移、径流发生与水分再分配过程构建了斑块之间的能量流、物流的源-汇关系。Li 等人<sup>[48]</sup>的试验证实了荒漠地区生物结皮水文物理特征的时空异质性,特别是对其拓殖生境的微地域的依赖性,是驱动温带荒漠化草原能流、物流“源-汇”过程的重要生态因素。因结皮水文特征异质性驱动的能量和物流过程,是调控荒漠化草原斑块状灌丛分布的重要动力。对比观测和人工气候室内的模拟研究表明,随着土壤结皮发育程度的提高(如盖度和生物量的增加),其净光合速率大幅提高,并表现出更强的氮固定能力。生物结皮的光合和呼吸速率,在日时间尺度上,与温度的变化较为一致;在季节时间尺度上,与水分的变化趋势更为一致。降水是影响生物结皮的光合和呼吸速率主要因素。对比研究认为,生物结皮为荒漠生态系统提供了土

壤氮和碳来源,是“源-汇”关系的组成。

在模拟试验条件下,荒漠化草原地带生物土壤结皮斑块产生的径流有 55% 被重新分配至灌丛斑块,而其产生的 75% 的侵蚀产物、63% 的有机质、74% 的氮和 60% 左右的溶解养分被径流携带而重新分配至灌丛斑块。野外观测条件下,在较小强度降水事件中(降雨强度 2.8 mm · h<sup>-1</sup>,降雨量 44 mm),裸地斑块产生的 32.93% 的径流、37.07% 的侵蚀产物、30.32% 的有机质、48.33% 的氮和 30% 的溶解养分被重新分配至灌丛斑块;而在较大强度降水事件中(降雨强度 5.7 mm · h<sup>-1</sup>,降雨量 31.1 mm),裸地斑块产生的资源分别有 18.93% 的径流、31.14% 的侵蚀产物、9.84% 的有机质、18.98% 的氮和 10% 的溶解养分被重新分配至灌丛斑块。表明资源再分配比例与降水事件有关<sup>[48]</sup>。

综上所述,生物土壤结皮的生态与水文功能在于:通过改变水分在植被-土壤系统中的循环和时空分布而调控了资源的有效性,驱动和调控荒漠植被的格局和过程,是理论识别荒漠化发生、发展或逆转的重要指标,也是荒漠生态系统碳、氮的重要来源<sup>[29]</sup>。

### 3 基于生态水文学原理的干旱区生态恢复模式

基于土壤水分和其他生态要素时空分布的异质性变化的长期监测和研究,李新荣提出了干旱荒漠地区植被生态恢复的理论模型/概念模型。认为土壤异质性程度在原生草地植被(土壤资源分布相对均一,土壤系统水分含量时空分布相对均一,有较低的空间异质性  $H_1$ )退化过程中,即由灌丛为优势的植被代替草本植被过程中增加(异质性程度高  $H_2$ );植被建设增加了沙丘土壤空间异质性( $H_1$ ),并随灌木在群落中的优势地位(较高的盖度)增加,而土壤具有较高程度的异质性( $H_2$ )(土壤资源中)。但固沙植被从灌木群落向以草本为优势的群落演变过程中土壤异质性程度又开始减弱(趋于  $H_1$ ),土壤资源的分布逐渐变得均一,且趋于天然植被的土壤资源分布特征(图 1)。因此,沙化草地的逆转或植被恢复的过程就是土壤资源分布的异质性程度减弱的过程,而草地沙化或退化则是土壤异质性程度从低到高的过程<sup>[10]</sup>。这一理论模型解释了我国沙区近 300 万 hm<sup>2</sup> 人工植被演变的机理,对干旱区植被建设和已有的人工植被的生态管理具有重要的理论价值<sup>[23]</sup>。

以上研究成果揭示了雨养、无灌溉人工固沙植被-生态系统对水循环的生物控制作用,初步解释了

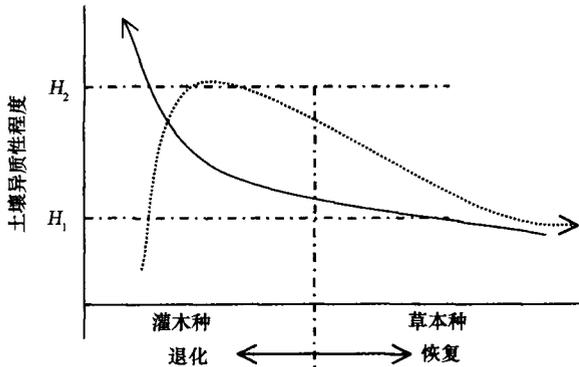


图1 干旱半干旱区草地荒漠化和恢复(荒漠化逆转)的概念模型<sup>[10]</sup>

(土壤异质性在原生草地植被退化过程中即由灌丛植被代替草本植被过程中增加,植被建设增加了沙丘土壤空间异质性,但固沙植被从灌木群落向以草本为优势的群落演变过程中土壤异质性程度又开始减弱(图中实线箭头曲线表示异质性增加趋势,虚线箭头曲线表示异质性从低到高再趋于降低的变化趋势)

Fig. 1 A conceptual model related to grassland desertification and restoration (desertification reverse) in arid and semiarid zones<sup>[10]</sup>

我国西北干旱地区荒漠人工固沙植被格局与过程、生态恢复过程中生物多样性的繁衍与水循环关系及其适应性对策的生态水文学机理,为建立不同植被配置类型耗水量的测算模型提供了实验支撑。对荒漠及荒漠化地区退化生态系统的恢复与重建,生态工程建设和荒漠人工固沙植被生态系统-水资源优化管理具有重要应用价值,提出了降水 $< 200$  mm干旱沙区有效调节生物土壤结皮生态水文学特性,以旱生灌木为优势种,草本和隐花植物为辅,且植被总盖度应小于30%的符合水量平衡与水循环规律的植被建设与生态水文学管理模式。

#### 4 展望

虽然土壤水分的空间结构及其随时间的变化与区域植被之间存在因果关系是众所周知的,但生态学家提出的很多模型则用于描述植被空间动态变化过程中的竞争作用,且大多数的模型是以出生率、死亡率以及繁殖的概率统计为基础,而没有客观地与土壤和因气候波动的水循环特征联系起来,同样,水文学在这方面的研究工作也较少<sup>[2]</sup>。可以说,以前的植被建设和生态恢复较少考虑土壤-植被-大气连续体的水循环过程和水量平衡的问题,SPAC/SVATs水循环的研究多针对在植被覆盖连续的作物或森林与草原植被系统<sup>[49]</sup>,尤其是在干旱区没有涉及到生物土壤结皮的水文功能和对水循环的影

响,再加上干旱荒漠地区植被格局的特殊性(因水分驱动多呈斑块状分布),一些从连续植被系统发展成功的模型也不适合于干旱植被的水文过程模拟研究。此外,许多水量平衡与水循环的研究也仅建立在植物个体和种群的尺度水平上,能够实现尺度转化,且具有很好代表性的研究报道很少<sup>[50]</sup>。

干旱区的生态恢复虽然在我国实践中取得了一定的成绩,但事实上其生态水文学机理的系统研究尚处在起步的阶段,特别是在降水小于200 mm,又以降水和土壤水(绿水)为主要水资源,且不发生生产的干旱沙漠区,较系统的土壤-植被系统的生态水文学联网研究少,这使得业已取得的成果的区域代表性带有一定的局限性而不能大范围应用推广。此外,植被恢复中的生态水文过程是一个十分复杂的过程,需要精确实验设计和长期定位观测等长期的科学积累作支撑,包括一些涉及水文研究的新方法和手段使用,如稳定同位素技术的应用,因此,利用水循环过程实验与分析,揭示水与生态的关系,研究特定生态系统水的生态阈值,运用生态水文学的原理和观点,对水资源进行优化管理的联网研究,增强诸多研究之间的对比性和区域代表性,对区域生态水文过程进行定量描述和建立分布式模型,揭示水资源利用影响生态恢复的规律,进而提出干旱区以生态恢复为主的水资源宏观调控和优化利用模式是今后干旱区生态水文学研究的重要方向和新的趋势,也是目前国家西部生态建设的重大科技需求。

#### 参考文献(References):

- [1] Baird A J, Wilby R L. Eco-hydrology: plant and water in terrestrial and aquatic environments[M]. Routledge; London and New York, 1999.
- [2] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. Eco-hydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics[M]. UK: Cambridge University Press, 2004.
- [3] Eagleson P S. Ecohydrology - Darwinian expression of vegetation form and function[M]. UK: Cambridge University Press, 2005.
- [4] Wainwright J. Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events SE France [J]. Catena, 1996, 26: 27-47.
- [5] Whitford W. Ecology of Desert Systems [M]. San Diego: Academic Press, 2002: 295-301.
- [6] Li X R, Xiao H L, He M Z, et al. Sand barriers of Straw checkerboard for habitat restoration in extremely arid desert region of China [J]. Ecological Engineering, 2006, 28: 149-157.
- [7] Breckle S W, Yair A, Vesté M. Arid Dunes Ecosystems, Eco-

- logical Studies 200[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008:450-453.
- [8] 郑度. 干旱区植被建设应遵循地带性规律[J]. 科学时报“区域发展”双周刊, 2006, 9:11.
- [9] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in Shapotou Region of Tengger Desert, Northern China [J]. Restoration Ecology, 2004, 12: 376-390.
- [10] Li X R. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration[J]. Science in China(Ser. D), 2005, 48: 2020-2031.
- [11] Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China[J]. Biology and Soil Fertility, 2002, 35: 147-154.
- [12] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57: 1-16.
- [13] Li X R, Zhang J G, Liu L C, et al. Plant diversity and succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China[M]//Lemons J(Eds.) Promoting Best Practices for Conservation and Sustainable Use of Biodiversity of Global Significance in Arid and Semiarid Zones. Kluwer Academic Publishers, 2003: 179-188.
- [14] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Evolutionary characteristics of the artificially revegetated shrub ecosystem in the Tengger Desert, Northern China [J]. Ecological Research, 2006, 21: 415-424.
- [15] Pan Y X, Wang X P, Jia R L, et al. Spatial variability of surface soil moisture content in a re-vegetated desert area in Shapotou, Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 1675-1683.
- [16] Wang X P, Li X R, Zhang J G, et al. Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes [J]. Hydrological Sciences, 2005, 50: 897-910.
- [17] Li T, Xiao H L, Li X R. Modeling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dunes in arid desert [J]. Arid Land Research and Management, 2001, 15: 41-48.
- [18] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 964-973.
- [19] Xiao H L, Cheng G D, Li X R, et al. Ecohydrological change mechanism of a rainfed revegetation ecosystem at southeastern edge of Tengger Desert, Northwest China[J]. Science in China (Series D), 2004, 47(Supp. I): 71-77.
- [20] Zhang J G, Li X R, Wang X P, et al. Ecological adaptation strategies of annual plants in artificial vegetation-stabilized sand dune in Shapotou region[J]. Science in China (Series D), 2004, 47(Supp. I): 50-60.
- [21] Wang X P, Berndtsson R, Li X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area[J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49: 283-295.
- [22] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert[J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 72-79.
- [23] Li X R, Kong D S, Tan H J, et al. Changes in soil and in vegetation following stabilisation of dune in southeastern fringe of the Tengger Desert, China[J]. Plant and Soil, 2007, 300: 221-231.
- [24] Zhang Z S, Li X R, Wang T, et al. Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Kracsh. in the Tengger Desert (North China)[J]. Arid Land Research and Management, 2008, 22: 195-211.
- [25] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, et al. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, northwestern China[J]. Journal of Plant Research, 2009, 122: 109-119.
- [26] Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China[J]. Geomorphology, 2007, 88: 254-265.
- [27] Li S Z, Xiao H L, Cheng G D. Mechanical disturbance of microbiotic crusts affects ecohydrological processes in a region of revegetation-fixed sand dunes [J]. Arid Land Research and Management, 2006, 20: 61-77.
- [28] Wang X P, Young M H, Yu Z, et al. Long-term restoration in soil hydraulic properties in revegetation-stabilized desert ecosystems[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: Dio. 10.1029/2007 GL031725.
- [29] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24.
- [30] Li X R, Chen Y W, Su Y G, et al. Effects of biological soil crust on desert insect diversity: evidence from the Tengger Desert of northern China[J]. Arid Land Research and Management, 2006, 20(4): 1-18.
- [31] Duan Z H, Wang G, Xiao H L, et al. A biotic soil crust formation on dune in an extremely arid environment: A 43-year sequential study [J]. Arid Land Research and Management, 2003, 17: 43-54.
- [32] Duan Z H, Xiao X H, Li X R, et al. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China[J]. Geomorphology, 2004, 59: 237-246.
- [33] Li X R, Zhang J G, Wang X P, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand fixing vegetation in arid desert region[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42: 965-970.
- [34] Li X R, Zhou H Y, Zhu Y G, et al. The effects of re-vegetation on cryptogam species diversity in Tengger Desert, Northern China[J]. Plant and Soil, 2003, 251: 237-245.
- [35] Jia R L, Li X R, Liu L C, et al. Responses of biological soil crusts to sand burial in vegetated area of the Tengger Desert, northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 2827-2834.
- [36] 何明珠, 李新荣, 张景光. 土壤生物结皮蒸散特征研究[J]. 中

- 国沙漠, 2006, 26(2): 159-164.
- [37] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性——以沙坡头沙漠研究试验站为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 404-410.
- [38] Liu L C, Song Y X, Gao Y H, et al. Effects of microbiotic crusts on evaporation from the revegetated area in a Chinese desert[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(6): 422-427.
- [39] Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, et al. Association between vegetation pattern and soil properties in the southeastern Tengger Desert, China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18: 369-383.
- [40] Li X R, Jia X H, Wang X P. Effects of biological soil crusts on seed bank, germination and establishment of two annual plant species in the Tengger Desert (N China)[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277: 375-385.
- [41] Su Y G, Li X R, Cheng Y W. Effects of biological soil crusts on emergence of desert vascular plants in North China[J]. *Plant Ecology*, 2007, 191: 11-19.
- [42] 龙利群, 李新荣. 微生物结皮对两种一年生植物种子萌发和出苗的影响[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 581-586.
- [43] 龙利群, 李新荣. 土壤微生物结皮对两种一年生植物幼苗存活和生长的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 656-660.
- [44] 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 等. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 938-946.
- [45] 苏延桂, 李新荣, 黄刚, 等. 实验室条件下两种生物土壤结皮对荒漠植物种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1845-1851.
- [46] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-11.
- [47] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328: 331-337.
- [48] Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China[J]. *Geomorphology*, 2008, 96: 221-232.
- [49] Bronstert A, Carrera J, Kabat P, et al. *Coupled Models for the Hydrological Cycle: Integrating Atmosphere, Biosphere, and Pedosphere*[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [50] 李新荣, 王涛. 沙地生态系统研究[C]//李文华, 赵景柱. 生态学回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004: 625-649.

## The Ecohydrology of the Soil Vegetation System Restoration in Arid Zones: A Review

LI Xin-rong, ZHANG Zhi-shan, WANG Xin-ping, LIU Li-chao, HUANG Lei

(Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Arid zones, which cover approximately 40 percent of the earth's land surface, support complicated and widely varied ecological systems. As such, arid zones are an important composition of the global terrestrial ecosystem, and water is the key and abiotic limited factor in ecosystem-driven processes in these areas. Ecohydrology is a new cross discipline that provides, in an objective and comprehensive manner, novel ideas and approaches to the evaluation of the interaction and feedback mechanisms involved in the soil vegetation systems in arid zones. In addition, ecohydrology provides a theoretical basis of ecological restoration that is centered on vegetation construction. In this paper, long-term monitoring and local observations in the transitional belt between a desertified steppe and a steppified desert at the Shapotou Desert Research and Experiment Station, Tengger Desert, in northern China, were evaluated. The primary achievements and related research progress regarding ecohydrology in arid zones were analyzed and summarized, as a keystone, and the response of soil ecohydrological processes to the changes in the species composition, structure, and function of sandland vegetation was discussed. Meanwhile, the long-term ecological effects and mechanism of regulation of vegetation on soil habitat and on water-cycling were considered. As a vital participant in the ecohydrological processes of soil vegetation systems, the studies on biological soil crusts was also summarized, and related theoretical models of restoration based on the water balance was reviewed.

**Keywords:** vegetation regulation by soil moisture; ecohydrology process; biological soil crust; ecological restoration of soil-vegetation systems