

DOI: 10.5846/stxb201506291332

张定海, 李新荣, 陈永乐. 腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Zhang D H, Li X R, Chen Y L. Simulation study on the effects of sand binding shrub on the deep soil water in a recovered area on the southeast fringe of Tengger Desert, North China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究

张定海^{1,2,*}, 李新荣¹, 陈永乐¹

1. 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站, 兰州 730000

2. 甘肃农业大学理学院 数量生态研究所, 兰州 730070

摘要:灌木是我国沙漠地区主要的优势植物类型, 固沙灌木的存在有益于沙丘的固定进而有利于退化沙漠生态系统的生态恢复。基于腾格里沙漠沙坡头地区 50 多年的人工植被区长期观测研究, 建立生态—水文模型模拟了该地区固沙灌木盖度和深层土壤水分的动态变化过程, 结果表明, 固沙灌木的建立改变了沙区原有的生态—水文过程, 在固沙灌木建立 40 多年后, 固沙灌木的盖度和深层土壤水分达到了新的平衡状态。灌木盖度逐渐稳定在 10% ($\pm 0.9\%$) 左右, 而深层土壤水分稳定在 2.58% ($\pm 0.2\%$) 左右。因此, 在年均降雨量为 186mm 的腾格里沙漠沙坡头地区, 土壤水分的最大植被承载力为: 灌木和生物土壤结皮的盖度分别维持在 10% 和 60%, 深层土壤水分维持在 3% 左右。

关键词:固沙灌木; 灌木盖度; 深层土壤水分; 生态-水文模型; 腾格里沙漠

Simulation study on the effects of sand binding shrub on the deep soil water in a recovered area on the southeast fringe of Tengger Desert, North China

ZHANG Dinghai^{1,2,*}, LI Xinrong¹, CHEN Yongle¹

1 Shapotou Desert Research and Experimental Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Center for Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Shrubs were the most important dominant plants in desert areas of China. Sand binding shrubs not only are vital to stabilize sand dunes in the desert, but also are beneficial to improve ecological restoration in the desert ecosystem. Based on a long-term monitoring and study (>50 years) at the Shapotou Desert Research and Experimental Station, which is located on the southeast edge of the Tengger Desert, we simulated the processes of the cover of sand-binding shrub and deep soil water content using an eco-hydrological model. The model revealed that the establishment of sand-binding shrub resulted in change in the hydrological processes comparing to the mobile sand dunes. The cover of sand-binding shrub and deep soil water content had reached to a new equilibrium after 50 years the sand-binding shrub established. The balance was the cover of sand-binding shrub remained stable at 10% ($\pm 0.9\%$) and the deep soil water content remained stable at 2.58% ($\pm 0.2\%$). In the Shapotou area of the Tengger Desert, the coverage of shrubs and biological soil crust were about 10% and 60% respectively, and the deep soil water content maintained at 3%, reflecting the maximum soil water carrying capacity of the vegetation.

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助(2013CB429900); 中科院西部之光在职博士项目; 甘肃农业大学盛彤生基金

收稿日期:2015-06-29; **修订日期:**2015-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangdh@gsau.edu.cn

Key Words: sand binding shrub; shrub cover; deep soil water; Eco-hydrological model ;Tengger Desert

利用人工固沙植被防止沙害是国际上公认的沙区生态重建和沙害防止最为有效的方法和途径之一^[1],在我国也已有 60 多年的历史^[2]。实践证明,植物固沙能够有效遏制沙漠化的发展、减轻风沙危害和促进局地生境恢复^[1]。我国先后在风沙危害区启动建设“三北”防护林体系、退耕还林等以人工植被建设为主要生态修复措施的一批重大生态工程^[3],包兰铁路沙坡头段的防护体系是我国沙区人工植被建设的典型代表^[4]。经过 60 多年的发展,我国沙区人工植被建设取得了举世瞩目的成就,有效遏制了沙漠化的发展,促进了局地生境的恢复。但在实践中也出现了许多问题,无论是在降水较大的东部沙区还是降水较小的贺兰山以西的西部沙区,都不同程度的存在局地地下水下降,固沙植被衰退和死亡的现象,这直接影响到沙区生态恢复和防风固沙效益的可持续性^[5]。

灌木是我国沙区主要的优势植物类型^[6-7],固沙灌木的存在有益于沙丘的固定进而有利于退化沙漠生态系统的生态恢复^[8]。这是因为相对于草本植物,灌木等木本植物更能忍受和适应风蚀、沙埋、放牧干扰以及干旱等非生物因子的胁迫^[9]。而草本植物的繁殖主要受到干旱气候条件、过度放牧和沙埋的制约^[10]。固沙灌木盖度的变化在一定程度上可以表征沙区生态系统的防风固沙效率,因此,研究固沙灌木盖度的动态变化规律对沙区人工植被建设和生态恢复具有重要的意义。

土壤水分是沙区植被系统格局和过程的驱动力^[11-12]。干旱沙区的水文过程控制着植物生长、植被演替和格局等主要的生态过程^[5]。研究干旱沙区固沙植被的动态以及与其相关的土壤水分动态是沙区生态恢复重建过程中必须面对的基础科学问题^[13-14]。20 世纪 50 年代,我国学者在包兰铁路沿线流动沙丘上建立了固沙植被防护体系,许多学者对该地区固沙植被动态和相关水文过程开展了研究,取得了系列成果^[2, 15-17]。如黄磊等^[17]结合 Rodriguez-Iturb 土壤水分动态随机模型,模拟了沙坡头人工植被区生长季土壤水分动态与土壤湿度概率密度函数;李新荣等^[2]利用沙坡头人工植被区 50 余年的长期生态学研究,指出了该地区人工植被的演替规律,初步探讨了降水小于 200mm 风沙区土壤水分的植被承载力和植物固沙的模式。

在一定的土壤水分条件下建立什么样类型的固沙植被,如何让植被建设更加持续有效,是防沙治沙过程中面临的重大科学问题^[2]。而确定土壤水分的植被承载力(有限的土壤水分所能承受固沙植被的最大载荷,其可以利用植被的相关属性进行量化表述)是回答这些问题的重要前提之一,是沙区生态重建的重要实践需求^[2, 18]。基于中国科学院沙坡头沙漠研究试验站在沙坡头地区 50 多年的长期定位研究资料,我们建立了固沙灌木的生态-水文模型,试图揭示固沙灌木和深层土壤水分的动态变化规律,进而确定了该地区土壤水分的植被承载力,更好的解释该地区固沙植被和土壤水分的动态变化过程。以期促进沙区生态-水文模型的研究,更好的服务于我国沙区生态建设。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头地区腾格里沙漠东南缘(37°32'N, 105°02'E),其主要景观类型为高大密集分布的格状沙丘。该地区年均平均温度为 10.0℃,最低气温为 25.1℃,最高气温为 38.1℃,全年日照时数为 3264h,年均降雨量为 186mm,年均风速为 2.9m/s,年潜在蒸发量为 3000mm,地下水埋深达 60m,植物无法利用^[2]。为了确保包兰铁路沙坡头段 40 余公里的畅通无阻,中国科学院和铁路相关单位于 1956 年开始相继设计和逐步建立了“以固为主、固阻结合”防沙固沙体系^[19]。其主要措施为(1)在流动沙丘上垂直于主风向扎设机械阻沙栏;(2)在阻沙栏后设置 1m×1m 的麦草方格作为固沙屏障,在无灌溉条件下主要栽植柠条(*Caragana korshinskii* Kom)、油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、花棒、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)、沙拐枣(*Calligonum arborescens* Litw.)和沙木蓼(*Atraphaxis bracteata* A.Los.)等旱生灌木,其株距与行距为 1m×2m 或 2m×3 m;(3)采用同样的方法和模式分别于 1964,1973,1982 和 1992 年在沿铁路两侧的区域

(全长 16km)进行植物固沙。沿铁路两侧形成了北侧宽 500—1000m,南侧宽 200—1000m 的固沙植被防护带。固沙植被建立初期,人工种植的灌木盖度逐年明显增加,从第 2 年的 3%增加到 15 年的 35%,随后其盖度又逐渐降低,固沙植被建立 45 年后,其盖度约为 9%,此后灌木盖度基本保持在 8%—10%。深层土壤水分在固沙植被建立初期约为 5%左右,当固沙植被建立 15 年后,深层土壤水分下降明显,约为 3.5%左右,而当固沙植被建立 40 余年后,深层土壤水分降低减缓,且逐渐稳定在 3%左右^[2]。早期的人工固沙植被经过大约 60 多年的演替,逐渐形成了稳定的植被群落,这为研究固沙植被的动态模型提供良好的基础。

1.2 数据来源

本研究选取 1956, 1964, 1982 年固沙植被区和流沙区作为研究样地,以 1982—2012 年样方监测的人工植被、土壤水分数据为研究材料。其中,土壤水分的测定是分别在不同年代的固定沙区和流沙区设置 10 个样方,每个样方设置 3 个取样点,在每个点分别测定 0—300cm 深的土壤水分含量,共包括 16 个土层:0—10cm, 10—20cm, 20—40cm,然后每间隔 20cm 测定一次^[20]。土壤水分的测定在 2000 年以前采用土钻取样称重法测定,2000 年以后采用中子水分测定法^[19],为了统一计量标准,将 2000 年以后的土壤体积含水量转换成重量含水量(体积含水量/容重)。同时根据固沙植被的根系分布规律^[21-22],将 0—40cm 深的土壤水分作为浅层土壤含水量,该层主要分布着草本植物的根系;40—300cm 层含水量作为深层土壤含水量,该层主要分布着木本植物灌木和半灌木的根系。固沙灌木盖度的调查均在土壤水分监测样方中进行,调查时间为每年 9 月底—10 月初,样方大小为 10m×10m。生物土壤结皮的盖度采用点针法估算得到^[13]。降水数据来自位于沙坡头站固沙植被区气象站从 1955 运行至今的观测资料。

2 固沙灌木演替动态模型

2.1 固沙灌木盖度动态模型

许多研究表明,灌木幼苗的根系和草本植物的根系在土壤表层有大量的重叠部分,但沙区灌木的盖度主要取决于成年灌木个体^[23-26]。根据 Walker 等人的生态位分化理论,灌木的盖度主要受到深层土壤水分的制约而草本植物的盖度主要受表层土壤水分的制约^[27-28]。同时野外调查实验的结果也表明了同样的结论^[29]。因此我们假设深层土壤水分是沙区灌木盖度唯一的限制因子,其他限制因子(如放牧、土壤养分等)都隐含在灌木盖度的增长率和死亡率中。基于上述假定,利用种群动态模型描述灌木盖度的动态变化规律,即

$$\frac{dT}{dt} = g_1(S)T + g_2(T)T - d(T)T \quad (1)$$

其中, T 表示灌木的盖度; S 表示深层土壤水分; $g_1(S)$ 表示在深层土壤水分制约下灌木盖度的增长率,我们采用 Logistic 增长模型描述,即 $g_1(S) = a_1(1 - e^{-a_2 S})$; $g_2(T)$ 表示灌木自身的增长率,其大小取决于灌木自身的繁殖能力的大小和密度制约效应的影响,假定 $g_2(T) = \frac{b_1}{T + b_2}$; $d(T)$ 表示灌木自身的死亡率,假定灌木的

死亡率主要受到灌木盖度的影响(灌木盖度的变化会导致深层土壤水分的变化),假定 $d(T) = \frac{c_1}{T + c_2}$; $g_1(S)$ 和 $g_2(T)$ 的取值均在 0 到 1 之间。

2.2 深层土壤水分动态模型

由于人工腾格里沙漠人工植被区的地下水埋深达 60m,灌木几乎无法利用,因此降雨是该地区土壤水分的唯一来源。同时,随着流沙的固定 10 年后,在沙面上逐渐形成了以蓝藻(如 *Hydrocoleus violaceus* Gom., *Microcolous vaginatus* Gom., *Nostoc* sp. 和 *Phormidium ambiguum* Gom. 等)为优势的结皮,40 年后出现了地衣(如 *Collema coccophorum* Tuck., *Collema tenax* Ach., *Diploschistes muscruum* Hoffm. Tomin 和 *Endocarpon aridum* P. M. McCarthy 等)和藓类(如 *Bryum argenteum* Hedw., *Didymodon vinealis* Zand., *Tortula bidentata* Bai Xue Liang 和 *Tortuladesertorum* Broth. 等)的混生结皮^[2]。生物土壤结皮的出现和演替显著地降低了降水的入渗^[2],使得沙

区深层土壤水分的水文过程发生了显著地变化。因此沙区深层土壤水分的变化等于降雨对深层土壤水分的补给量减去生物土壤结皮对深层土壤水分入渗的阻滞量减去灌木自身生长所消耗的深层土壤水分。因此,深层土壤水分的动态模型可以表示为:

$$\frac{dS}{dt} = F(P) - G(Z) - H(T) \quad (2)$$

其中, S 表示深层土壤水分; P 表示降雨量; Z 表示生物土壤结皮的盖度; T 表示灌木的盖度; $F(P)$ 表示降雨对深层土壤水分的补给函数,其函数形式可通过流动沙丘上深层土壤水分和年降雨量的相关分析得出; $G(Z)$ 表示生物土壤结皮对深层土壤水分入渗的阻滞函数,假定生物土壤结皮对深层土壤水分入渗的阻滞量生物土壤结皮的盖度成正比,即 $G(Z) = \alpha Z(t)$,其中 $Z(t)$ 表示生物土壤结皮盖度随时间变化的函数; $H(T)$ 为灌木生长消耗的深层土壤水分,假定灌木消耗的深层土壤水分量与灌木的盖度成正比,即 $H(T) = \beta T$, β 为比例因子。

2.3 固沙灌木影响深层土壤水分动态模型

将固沙灌木盖度动态模型(1)和深层土壤水分动态模型(2)耦合可得固沙灌木影响深层土壤水分动态模型:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = g_1(S)T + g_2(T)T - d(T)T \\ \frac{dS}{dt} = F(P) - G(Z) - H(T) \end{cases} \quad (3)$$

(3)式耦合了固沙灌木盖度的动态变化和深层土壤水分的动态变化,同时考虑了生物土壤结皮对深层土壤水分入渗量的影响。将深层土壤水分制约下灌木盖度的增长率函数 $g_1(S)$ 、灌木自身的增长率函数 $g_2(T)$ 、灌木的死亡率函数 $d(T)$ 、生物土壤结皮对深层土壤水分入渗的阻滞函数 $G(Z)$ 以及灌木生长消耗的深层土壤水分函数 $H(T)$ 的具体形式代入(3)式得:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = a_1 T(1 - e^{-a_2 \cdot S}) - \frac{b_1 T}{T + b_2} - \frac{c_1 T}{T + c_2} \\ \frac{dS}{dt} = F(P) - \alpha Z(t) - \beta T \\ T(0) = 3 \\ S(0) = 3.22 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $T(0) = 3$ 表示固沙植被盖度的初值, $S(0) = 3.22$ 表示固沙植被建立初期深层土壤水分的初值。

3 结果与分析

3.1 降水对深层土壤水分的补给函数

通过 1982 年以来 32 年流沙区深层土壤水分和年降水量数据的相关性分析发现,深层土壤水分与年均降水量具有显著相关性,其皮尔逊相关系数为 0.6824 ($p < 0.001$)。进一步线性回归分析建立了年降水量 P 与深层土壤水分的回归方程(图 1),回归方程的表达式为:

$$F(P) = 1.258 + 0.0083P \quad (5)$$

其中,回归方程的相关系数为: $R^2 = 0.4656$, $p < 0.001$,回归方程具有显著地统计学意义。

3.2 生物土壤结皮的盖度随时间变化的函数

在沙坡头人工固沙区,随着流沙的固定,沙面上逐渐形成了以蓝藻为优势的生物土壤结皮,生物土壤结皮的盖度和种类也随着固沙植被的拓殖逐年增加。为了简单起见,将生物土壤结皮的盖度简化为随时间变化的函数。因生物土壤结皮的盖度不会无限制的增长,利用 Michaelis-Menten 模型(米氏方程)描述生物土壤结皮盖度 Z 随时间变化的关系:

$$Z(t) = \frac{d_1 t}{t + d_2} \quad (6)$$

根据已收集的生物土壤结皮盖度随时间变化的数据, 利用 Matlab (Matlab 2014a 8.3.0.532) 软件进行非线性拟合得(6)式的各个参数为(图2): $d_1 = 67.39$, 95%的置信区间为(52.23, 82.55); $d_2 = 13.53$, 95%的置信区间为(4.47, 22.59); 相关系数 $R^2 = 0.9625$ 。

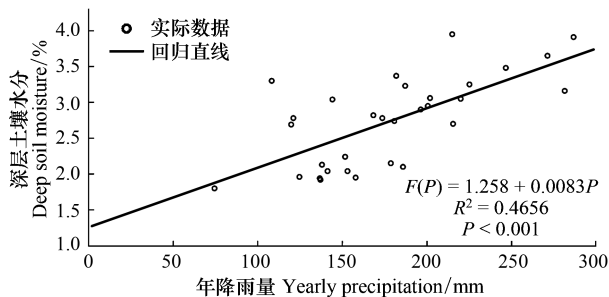


图1 流沙区深层土壤水分与年降雨量的关系

Fig.1 The interactions between deep soil moisture and yearly precipitation in mobile sand dunes

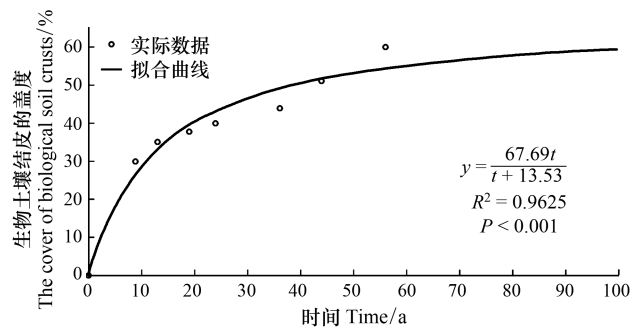


图2 生物土壤结皮盖度随时间的变化

Fig.2 The dynamics of biological soil crusts (BSC) coverage varied with time

3.3 固沙灌木影响深层土壤水分动态模型的模拟

将降雨对深层土壤水分的补给函数 $F(P)$ 和生物土壤结皮的盖度随时间变化的函数 $Z(t)$ 代入(4)得:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = a_1 T(1 - e^{-a_2 S}) - \frac{b_1 T}{T + b_2} - \frac{c_1 T}{T + c_2} \\ \frac{dS}{dt} = 1.258 + 0.0083P - \alpha \frac{67.39t}{t + 13.53} - \beta T \\ T(0) = 3 \\ S(0) = 3.22 \end{cases} \quad (7)$$

利用已经得到的 56 年的深层土壤水分和灌木盖度的观测数据, 模拟得到腾格里沙漠东南缘沙坡头地区人工固沙植被区灌木盖度和深层土壤动态变化规律(如图 3 和 4 所示), 模型参数的估计采用近似贝叶斯估计法利用 Matlab 软件(Matlab 2014a 8.3.0.532)得到, 模型参数为: $a_1 = 2$, $a_2 = 0.6$, $b_1 = 0.3$, $b_2 = 0.5$, $c_1 = 0.2$, $c_2 = 0.7$, $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.03$ 。

由图 3 可以看出, 深层土壤水分从第 2 年(4.86%)开始急剧减少, 至第 13 年左右达到最小值(1.57%), 随后深层土壤水分在 2.58% ($\pm 0.2\%$) 左右小幅波动。由图 4 可以看出, 灌木盖度从第 2 年(3.36%)开始逐年增长, 至第 10 年达到最大值(35.42%), 随后灌木盖度开始急剧减少, 40 年以后灌木盖度逐渐稳定在 10% ($\pm 0.9\%$)。结果表明, 灌木盖度和深层土壤水分最终均达到了稳定状态, 且不依赖于初值。这些结果与该地区长期观测数据基本吻合。

4 讨论与结论

4.1 植被对深层土壤水分的影响

在固沙植被建立初期, 由于灌木的盖度较小、地表草本植物稀疏、生物土壤结皮层很薄且盖度很小, 固沙植被对深层土壤水分的动态影响较小。随着植被中灌木、草本和隐花植物盖度的增加和发展, 植被冠层对降水的截留可达 27%^[30], 生物土壤结皮层的增厚和演变(蓝藻结皮被以藓类结皮为优势的结皮所替代)显著的降低了降水的入渗^[14]; 此外, 随着灌木根系系统的发展使深层(40—300cm)土壤水分被大量利用, 且因入渗的减少而得不到足够的降水补给, 进而使深层土壤水分明显下降(图 3)。随着深层土壤水分的降低和固沙植

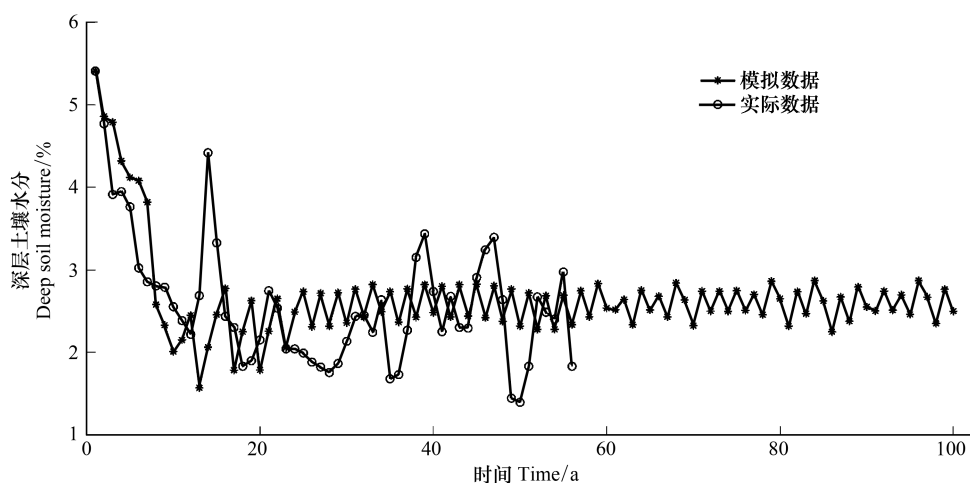


图3 深层土壤水分随时间的动态变化

Fig.3 The dynamics of deep soil moisture varied with time

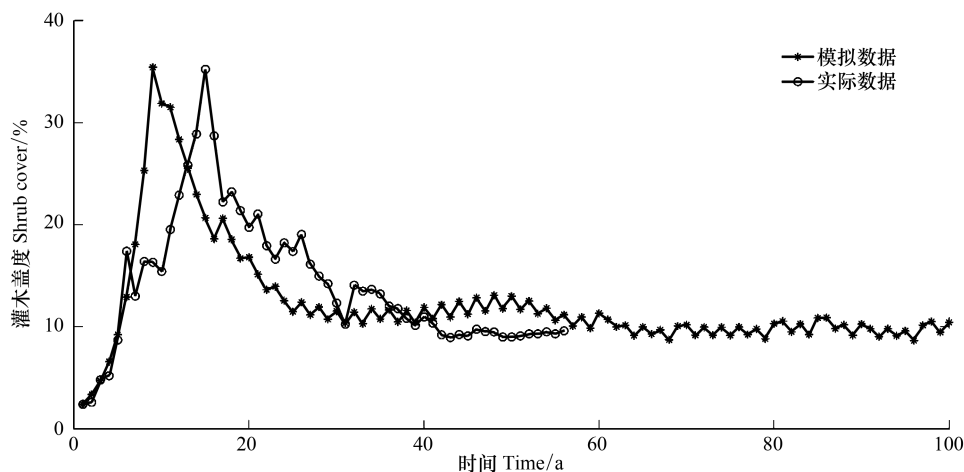


图4 灌木盖度随时间的动态变化

Fig.4 The dynamics of shrub coverage varied with time

被的演变,一些灌木种在群落中消减,灌木在群落中维持较低的盖度(图4),致使灌木层减少了对降水的截留和对深层土壤水分的利用;此外,生物土壤结皮层的大量生物干扰,如沙蜥、蚂蚁和其他微小动物的活动,又在一定程度上增加了降水的入渗^[31],使深层土壤水分得到了一定的补给而能够维持并稳定在一定的范围。

4.2 深层土壤水分动态对固沙灌木的影响

深层土壤水分的动态变化直接影响着固沙灌木的组成和动态变化过程。在固沙植被建立前的流沙区,深层土壤水分和年降雨量具有显著的线性相关性(图1),随着固沙植被的建立(包括生物土壤结皮的拓殖),使得深层土壤水分得到的降水补给减少,表层的持水能力增加,年降雨量和深层土壤水分的相关性发生了显著的改变,这些变化相应的驱动着固沙植被的演替和动态变化。当固沙植被建立15年后,深层土壤水分下降明显(图3),以草本层为优势的群落替代了原来结构相对简单的灌木群落;当固沙植被建立40余年后,初步形成了稳定的生物土壤结皮群落(图2)和灌木群落(图4),深层土壤水分降低减缓(图4),且趋于稳定,使得灌木盖度也逐渐稳定在10% ($\pm 0.9\%$)左右。

4.3 土壤水分的植被承载力

土壤水分的植被承载力是衡量某一地区固沙植被重建的重要依据,可以定义为有限的土壤水分所能承受固沙植被的最大荷载,其可以用植被的相关属性进行量化表述^[2]。当新的植被-土壤水分平衡达到时,在给

定降雨条件下形成的植被的稳定性特征与土壤水分平衡是确定植被承载力的重要依据。模型的结果表明,在年均降雨量为 186mm 的腾格里沙漠沙坡头地区,灌木和生物土壤结皮的盖度分别维持在 10% 和 60%, 深层土壤水分维持在 3% 左右,反映了该地区土壤水分的最大植被承载力。因此,未来在这一区域实施植被重建时,遵循灌木盖度和生物土壤结皮的盖度不宜超过上述阈值,是确保固沙植被稳定和固沙效益持续的重要前提。

参考文献 (References):

- [1] Le Houerou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(1): 3-14.
- [2] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 高艳红, 刘立超, 王新平. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 257-266.
- [3] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [4] 马风云, 李新荣, 张景光, 李爱霞. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 789-795.
- [5] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. *科学通报*, 2013, 58(5-6): 397-410.
- [6] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1-16.
- [7] Li X R. Study on shrub community diversity of Ordos Plateau, Inner Mongolia, northern China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(3): 271-279.
- [8] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of fertile islands in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 1989, 16(3): 257-262.
- [9] Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, Wang X P, Jia X H. Association between vegetation patterns and soil properties in the southeastern Tengger Desert, China. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18(4): 369-383.
- [10] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994.
- [11] Evenari M, Noy-Meir I, Goodall D W. *Hot Deserts and Arid Shrublands*, A. Netherlands: Elsevier Science Publishers BV, 1985.
- [12] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [13] 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.
- [14] Li X R, Tian F, Jia R L, Zhang Z S, Liu L C. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy deserts? Implications for managing artificial vegetation. *Hydrological Processes*, 2010, 24(25): 3621-3630.
- [15] 刘志民. 植物适应干扰机制和干扰对植被过程影响的若干例证研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(寒区旱区环境与工程研究所), 2001.
- [16] 石莎. 沙坡头地区人工植被群落结构及动态[D]. 北京: 中央民族大学, 2004.
- [17] 黄磊, 张志山, 陈永乐. 干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 568-573.
- [18] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [19] 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施. 银川: 宁夏人民出版社, 1991.
- [20] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, Wang X P, Kim K C. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(1): 1-16.
- [21] 刘嫒心, 李玉俊, 杨喜林. 沙生植物的根系 // 沙坡头沙漠科学站论文集. 银川: 宁夏人民出版社, 1991: 1-14.
- [22] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, Jia R L, Zhang J G, Wang T. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, northwestern China. *Journal of Plant Research*, 2009, 122(1): 109-119.
- [23] Higgins S I, Bond W J, Trollope W S W. Fire, resprouting and variability: a recipe for grass-tree coexistence in savanna. *Journal of Ecology*, 2000, 88(2): 213-229.
- [24] Higgins S I, Scheiter S, Sankaran M. The stability of African savannas: insights from the indirect estimation of the parameters of a dynamic model. *Ecology*, 2010, 91(6): 1682-1692.
- [25] House J I, Archer S, Breshears D D, Scholes R J. Conundrums in mixed woody-herbaceous plant systems. *Journal of Biogeography*, 2003, 30(11): 1763-1777.
- [26] D'Onofrio D, Baudena M, D'Andrea F, Rietkerk M, Provenzale A. Tree-grass competition for soil water in arid and semiarid savannas: The role of rainfall intermittency. *Water Resources Research*, 2015, 51(1): 169-181.

- [27] Walker B H, Ludwig D J, Holling C S, Peterman R M. Stability of semi-arid savanna grazing systems. *Journal of Ecology*, 1981, 69(2): 473-498.
- [28] Walker B H, Noy-Meir I. Aspects of the stability and resilience of savanna ecosystems // *Ecology of Tropical Savannas*. Berlin Heidelberg: Springer, 1982: 556-590.
- [29] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, Wang X P. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger desert, northern China. *Restoration Ecology*, 2004, 12(3): 376-390.
- [30] Wang X P, Li X R, Zhang J G, Zhang Z S, Berndtsson R. Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes/ Mesure de l'interception de la pluie par des arbustes xérophiles sur des dunes de sable replantées. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 897-910.
- [31] Li X R, He M Z, Duan Z H, Xiao H L, Jia X H. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China. *Geomorphology*, 2007, 88(3-4): 254-265.