



## 评述

## 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制

李小雁<sup>①②</sup>

① 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

② 北京师范大学资源学院, 北京 100875

E-mail: xyli@bnu.edu.cn

收稿日期: 2011-04-01; 接受日期: 2011-10-17

国家自然科学基金(批准号: 41025001, 41130640, 40871025)、长江学者和创新团队发展计划和中央高校基本科研业务费专项资助

**摘要** 从单个植株、坡面和流域三个尺度综述了干旱地区土壤-植被-水文耦合与响应的研究进展, 并提出今后研究中需要关注的科学问题. 未来研究需要通过多学科交叉与融合手段, 加强土壤-植被系统整体性综合集成研究, 主要包括地上与地下过程、植被退化与恢复过程、自然与人为扰动过程、多尺度与多要素综合观测与模拟. 初步提出干旱地区植被的水分聚集适应理论, 分析并讨论了树干茎流水分聚集系统、灌丛斑块水分聚集系统和沟道河网水分聚集系统的组成、结构和特点, 揭示了不同水分聚集系统对水分胁迫的适应机制, 可为干旱地区植被恢复提供理论支撑和实践指导.

**关键词**土壤植被系统  
生态水文  
水分聚集  
抗旱适应机制

从植被冠层到地下含水层的部位被称为“地球关键带”(Earth's Critical Zone)<sup>[1]</sup>, 它是地球表层系统的重要组成部分, 也是与人类生存发展关系最密切的关键区域. 土壤和水是地球关键带的核心要素, 土壤为植物的生长和发育提供了必要的水分和养分, 是连接大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的重要纽带, 也是许多生物、物理和化学过程进行的主要场所; 水是各圈层间进行物质能量交换的主要驱动力, 是物质与能量的主要载体. 土壤、水与植被之间的相互作用关系与耦合机理研究, 可揭示陆地表层系统水、土关键要素的变化过程及其生物作用机制, 为理解陆地表层复杂系统变化过程与机理提供科学依据.

在干旱地区, 水分是制约植物生长的主要生态因子, 水文过程决定土壤-植被系统的演化方向和生态功能, 它不仅在调节植物对土壤水分的利用方面, 而且在生态系统的水分循环过程中扮演着重要角色,

同时对地下土壤生态系统的碳氮磷循环与养分平衡等关键过程产生重要影响. 土壤-植被-水文的相互作用是一个复杂的多界面过程, 涵盖降水、地表水、土壤水、地下水、气态水和植物水的相互转化与耦合, 而且在不同的空间尺度上具有不同的反馈与响应. 本文在总结国内外已有研究的基础上, 从不同空间尺度上阐述干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制研究进展, 并展望未来的研究趋势.

## 1 土壤-植被-水文过程耦合与响应

### 1.1 单个植株尺度

植物与水文过程的作用首先是地上冠层对降水的再分配过程, 冠层截留的一部分降水被植物叶片、茎秆吸收或通过蒸发返回大气, 另外一部分则通过穿透雨和树干茎流渗入土壤或形成地表径流; 同时

植物根系通过土壤吸收水分并通过叶片气孔向大气蒸腾水汽, 形成了土壤-植被-大气系统水分传输过程. 干旱地区降水的脉冲性、土壤异质性和植被类型差异等决定了土壤-植被-大气传输过程的复杂性.

干旱地区降水的发生时间、持续时间和强度具有很大的间歇性和不确定性, 导致土壤-植被系统水文过程和土壤水分变化的不稳定性. 干旱地区降水次数少且变率大, 小降水事件发生频率高, 对年降水总量的贡献较小, 而大降水事件发生频率低, 却对年降水总量的贡献大. 以我国半干旱区为例, 小于 5 mm 降水事件的发生频率在 75% 左右, 总量在 61~99 mm 之间, 对年降水的贡献相对稳定, 占年降水总量的 14%~25%, 而  $\geq 10$  mm 降水事件的发生频率在 16% 左右, 总量在 188~307 mm 之间, 年际变异较大, 占年降水总量的 52.1%~65.4%, 且随年降水总量的增加呈上升趋势(图 1), 表明大降水事件在不同年份的差异是降水总量和降水格局差异的主要原因. 降水事件的大小和空间分布与局部地形及土壤的相互作用影响土壤水分补给的深度和范围, 间接影响不同功能型植物的分布. 大降水事件能够有效补给深层土壤水分, 有利于深根性灌木利用, 小降水事件只能补给表层土壤水分, 可促进草本植物生长<sup>[2]</sup>. 目前, 降水脉动规律及其对植物生长和土壤水分的影响机理是干旱区生态水文学面临的热点和难点科学问题, 而且气候变化也会改变降水的强度和分布格局, 因此需要加强干旱地区不同优势植物群落、土壤类型及

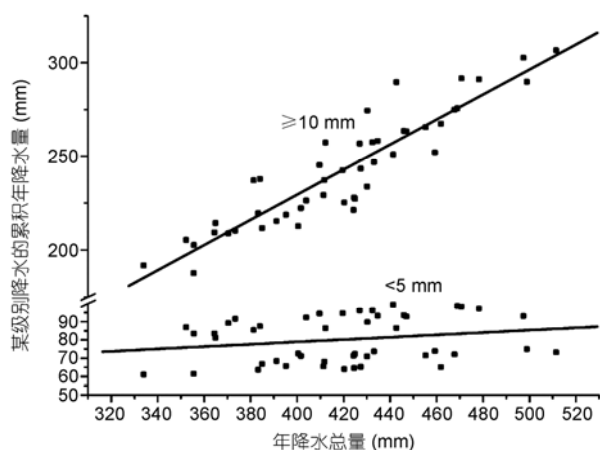


图 1 半干旱区  $< 5$  mm 和  $\geq 10$  mm 降水对年降水总量的贡献

根据中国半干旱区 48 个国家气象站 1957~2003 年的逐日降水资料计算

生态系统在不同时空尺度对降水的响应实验观测研究, 揭示其响应机制并建立相应模式.

降水特性对植被的水分再分配过程具有很大影响, 体现在对截留、穿透雨和树干茎流水文过程及水分在土壤中的运移路径和分布格局的影响. 不同功能型植物的降水截留量与降水量基本呈正相关关系, 但受降水特性(雨量、雨强、历时)和冠层结构(冠幅、株高、叶面积、地径和树皮等)的影响, 不同类型植被截留量差异很大. 通过对 1940~2010 年 46 篇相关文献分析, 干旱地区植被的降雨截留、穿透雨和树干茎流占降雨的百分数分别为  $26.9\% \pm 18.7\%$ ,  $65.2\% \pm 15.5\%$  和  $11.5\% \pm 11.9\%$ , 草本植物的截留量( $38.4\% \pm 32.3\%$ ) 大于乔木 ( $23.6\% \pm 14.9\%$ ) 和灌木 ( $24.8\% \pm 12.9\%$ ), 而灌木的树干茎流( $12.1\% \pm 12.4\%$ ) 大于乔木 ( $10.3\% \pm 11.6\%$ ). 截留、穿透雨和树干茎流的不同分配比例直接影响到达土壤中的水量和空间分布. 目前有关植被降雨截留的研究主要集中在热带雨林和温带森林, 针对干旱、半干旱区植被的研究还十分缺乏. 由于数据资料有限, 在许多陆面模式和水文模型中, 降雨截留多采用经验数据或简单假设. 特别是由于树干茎流占降雨量的比例较小, 在水文过程分析与水量平衡计算中常被忽略. 植被冠层通过与截留、穿透雨和树干茎流水文过程的耦合改变了局部土壤水分的分布, 而土壤水分同时又影响植物种群结构、拓展和进化, 形成了植被、土壤和水文过程的耦合与响应关系. 干旱地区植物还可通过根系响应土壤水分异质性分布, 具有水力提升(hydraulic lift)功能, 即在水势差的驱动下, 处在下层较湿润的土壤中的根系可从土壤中吸收水分并将其运输和释放到表层土壤中, 进而改善表层土壤水分状况, 保证植物干旱生长用水<sup>[3,4]</sup>. 水分在土壤中的运移过程及植物的水分利用来源问题研究还十分不足, 目前这方面的观测资料和实验成果还不能得出令人信服的论断. Brooks 等<sup>[5]</sup>的一项新发现对传统的水分在土壤中平移(translatory flow)理论提出了质疑, 认为降水下渗到土壤被植物利用的水分和汇流到溪流中的水来源不同, 并提出了土壤水分可能由植物利用的结合水(bound water)和汇入溪流的运动水(mobile water)组成的假说. Ryel 等<sup>[6]</sup>基于干旱地区植物水分利用和养分有效性研究提出了浅层植物生长土壤水库(growth pool)和深层水分维持水库(maintenance pool)概念模型. 因此土壤水分运动规律和植物水分来源仍然还

是今后土壤-植被-水文过程耦合研究的一项重要内容。

在单株尺度上, 尽管干旱地区土壤、植被和水文的相互作用关系已开展了大量研究, 但还存在以下不足: (1) 需加强土壤学、植物学和水文学的交叉和整合研究. 传统的土壤学主要侧重于从地表到植物根层(0~2 m)土壤水分的变化, 常常忽略了根层以下到地下水以上深层包气带水分变化, 而且土壤中的水分和物质迁移研究大多是在没有考虑生物因素影响条件下进行的<sup>[7]</sup>; 植物学更多侧重于植物如何利用水分和养分, 缺乏植物对土壤和水文过程的响应研究<sup>[8]</sup>; 水文学常常通过水文测验、仪器定点观测、遥感反演和模型模拟的方法研究区域或流域尺度水文过程, 小尺度上的实验大多是单因素控制实验, 常忽视土壤自然结构和植物根系等对水文过程和生态功能的影响, 新兴交叉学科生态水文学和水文土壤学可为土壤、植被和水文的相互作用研究提供新思路和方法<sup>[9-11]</sup>. (2) 地上过程研究比较深入, 地下过程研究相对滞后. 在土壤-植被系统中, 根土界面被认为是陆地表层土壤生态系统中物质和能量交换最频繁、也是生物、物理和化学调控作用与过程最活跃的一个功能区域. 然而, 由于根系生长在地下, 实验观测难度极大, 因此迄今为止人们对根土界面的水分运移规律及其生态功能的认识依然非常有限, 目前我们无法准确回答土壤结构形态和植物根系如何影响水分在土壤中的运移(如优势流)过程和不同土壤水文过程如何控制植物水分利用, 因此需要将植被地上部分和地下部分联接起来开展多因素综合观测研究.

## 1.2 坡面尺度

坡面是连接斑块和流域尺度的重要地貌景观单元, 受降水、植被、地形、地质和土壤的空间异质性及人类扰动的影响, 径流、入渗和蒸散发等水文过程具有高度的非线性特征和尺度效应<sup>[12,13]</sup>. 干旱地区坡面径流过程与湿润区有较大差异, 多属超渗产流, 呈现汇流速度快和损失水量较小特点. 由于地表覆盖的非连续性和异质性特点, 坡面径流具有多源产流特征<sup>[14]</sup>. 干旱地区坡面常常呈现植被和裸地斑块镶嵌分布景观特点, 在斑块尺度上, 植被斑块和裸地斑块在土壤水分贮存量、径流量、入渗速率等方面存在着显著差异, 裸地斑块径流量大, 植被斑块入渗量大, 它们在水分上存在“源”、“汇”关系, 土壤水分是

斑块植被分布的关键性内控因素. 目前, 在植被斑块尺度还需加强以下研究: (1) 植被斑块格局形成过程与土壤水分的相互作用机制及关键影响因素的识别与量化; (2) 植被斑块的自组织系统对气候变化和人类活动的响应与维持机理; (3) 植被斑块分布格局的生态学意义及对干旱地区植被恢复的指导性. 在坡面尺度上, 径流过程主要受降雨强度、地形、土壤和坡面水文连通度等影响, 且径流产生的数量和频率相应减少<sup>[13,15]</sup>. 在干旱地区, 由于降水量小且产流次数少, 实验观测难度大, 目前坡面降雨径流形成机制、发生频率和产生条件等问题还不清楚, 尤其对地下径流在异质性土壤中的运移规律缺乏深入观测研究, 许多水分运移模型(例如达西定律、霍顿产流理论、理查德方程)都假设土壤为均质介质, 不能真实反映和准确解释水分在异质性土壤中的流动速度、路径和动态变化过程(例如壤中流和优势流). 坡面土壤空间异质性及其水文功能识别是前沿科学问题, 需要借助大量地面观测实验和地球物理的方法研究土壤水分运动参数异质性特征及其与土壤结构、地表组成(植被类型、结皮层、枯枝落叶、砾石含量等)、地形(坡度、坡向)和气候等因素的交互作用关系, 辨识坡面水文过程与植被和土壤相互作用的关键主导因子. 另外还需结合遥感、地理信息系统和计算机建模等手段, 研究坡面水文连通性及其水分运移规律, 特别需要加强坡面地表径流和地下径流相互转换和自组织空间分布网络结构研究<sup>[16]</sup>, 划分具有相似水文特性的水文响应单元, 建立不同水文地理条件的水文土壤功能分类体系, 为开发基于物理过程分布式流域水文模型提供理论基础.

## 1.3 小流域尺度

流域是最基本的水文地貌单元, 它是以河流为中心, 被分水岭所包围的区域. 在小流域尺度上, 干旱地区产流区多位于山地或丘陵, 主要是地表径流, 而在平原或缓坡区, 局地径流易于汇集洼地或植被斑块处. 在沙地和戈壁地区, 入渗强度远大于降雨强度, 水分就地入渗, 并不产流, 成为无流区或不产流区.

受地形、气候、土地利用和人类干扰等多种因素影响, 流域中的土壤、植被与水文过程相互作用十分复杂. 近年来以流域为中心的干旱地区土壤-植被-水文过程研究成为国际研究前沿, 世界一些国家已经

先后实施了以流域为单元的大型综合观测、试验、模拟研究计划,例如非洲撒哈拉沙漠半干旱热带地区水文大气先行性研究计划(Hapex-Sahel),美国 San Pedro River 流域的半干旱区陆面-大气研究计划(SALSA)以及我国的正在实施的“黑河流域生态-水文过程集成研究”国家自然科学基金重大研究计划等,这些大型观测和研究计划的实施为认识和解决复杂的流域科学问题奠定了重要基础,成为地球系统科学研究的重要部分。

早期的流域土壤-植被-水文过程研究主要集中在湿润地区森林植被和土地利用/覆被变化对河川径流量、洪水和水质等方面的影响<sup>[17,18]</sup>,这些研究大多采用比较流域观测和模型模拟的方法,缺乏流域内土壤、植被与水文之间的耦合作用过程及其尺度效应的研究,且研究结果还存在争议。多数研究认为森林植被能减少年径流量,调节枯水径流及削减洪峰等作用,而以前苏联学者为代表和我国部分地区的研究还表明森林植被的存在增加年径流量,匈牙利西部阿巴拉契地区的研究还表明森林植被对年径流量基本无影响<sup>[19]</sup>。干旱地区的相关研究相对较少,而且较多的是单因素影响或单方向研究,如植被变化对水文过程的影响研究或水文过程对植被的影响研究<sup>[20]</sup>,土壤对水文过程和植被变化的影响及其相互作用机制研究不够深入,未来研究需要突出土壤异质性和植被动态特征,研究植被的结构、生长和物候的季相变化(植被叶面积指数和根系生长动态)、植被动态演化过程(退化与恢复)与土壤水文过程的互馈作用机制,准确刻画植被从群落、生态系统到景观和流域尺度对土壤发育和水文过程的影响及耦合机理。

流域土壤、植被和水文变量具有很大的空间异质性,由于生态水文过程的高度非线性特征,目前缺乏植被生态过程、水文过程和土壤过程的耦合与尺度转换的理论与方法,因此基于点和坡面的实验观测结果很难直接推绎到流域景观尺度上。流域尺度上土壤-植被-水文过程耦合涉及多重因素,需要运用系统分析和模拟的方法去实现,需要在流域尺度上开展多要素、多尺度的土壤-植被-水文过程耦合与集成研究,探讨不同尺度上的机理,分析其尺度特征和尺度效应,发展尺度转换方法,发展耦合模型<sup>[21]</sup>。现有流域水文模型中一般将植被作为已知条件,通过参数拟合来模拟水文响应。现有的植被生长模型大多数来源于生物物理模拟模型,生态系统模型的重点在

于植被碳循环的模拟,主要包括植被碳吸收以及碳在植物体内的分配,对水文过程的模拟大多属于经验性的,一般仅简单考虑土壤水分对植被生长的胁迫作用<sup>[20]</sup>。因此开发基于过程的流域分布式生态水文模型是目前研究的迫切需要,而对水文系统的深刻认识、复杂系统建模和多学科交叉等问题成为分布式水文建模必须面对的难点。未来流域研究需要构建多学科、多尺度、高精度、高分辨率、遥感-地面一体化的流域综合观测系统和研究体系,才能揭示流域土壤、植被与水文过程的耦合机理,建立尺度转换理论和方法及基于过程的机理模型<sup>[22,23]</sup>。

## 2 干旱地区植被对水分胁迫的适应机制与水分利用策略

### 2.1 植物生理生态对干旱胁迫的响应与适应

植物对水分胁迫环境的响应与适应是多途径和多方面的,涉及植物的生理生化代谢调节、种群遗传进化、以及植物形态对土壤水分的调节适应等<sup>[24]</sup>。干旱胁迫下,因植物体大量缺水而产生渗透胁迫,体内通过有效溶质(如可溶性糖、脯氨酸、甜菜碱、肌醇、胆碱、甘露醇、多胺、 $K^+$ 和  $Ca^{2+}$ 等)积累,维持膨压和较低渗透势,以增强其抗脱水能力。水分胁迫可使植物细胞内合成酶类活性下降,水解酶类和某些氧化还原酶类活性增高,体内脯氨酸和丙二醛含量增加<sup>[25]</sup>。植物也通过气孔调节和根系的可塑性响应干旱胁迫,根系不但调节水分的吸收,而且通过释放干旱信号于气孔,进而调节水分的散失<sup>[26,27]</sup>。植物的抗旱性还受基因和植物激素的控制,植物抗旱诱导蛋白 LEA(胚胎发生后种子中大量积累的一系列蛋白质)具有保护生物大分子,维持特定细胞结构,缓解干旱胁迫的作用<sup>[28]</sup>。目前已有研究主要集中于实验室条件下水分胁迫植物的生理生态特性方面,有关野外天然植被的实验观测研究还很缺乏,需将抗旱植物的生理、生态以及基因调控作为一个有机整体加以研究。未来研究应结合分子生物学手段,从其生物量积累与分配、气体交换、水分利用效率、脱落酸含量、生理和生化等特性的变化及其与植物抗旱基因表达的内在联系方面,进行水分胁迫下植物信号识别与转录、逆境蛋白的诱导和相关基因调控,以及特殊生境下植物抗旱性的研究,以全面了解植物抗旱适应机制。

## 2.2 干旱地区植被水分聚集适应理论与高效用水策略

植物对干旱环境的适应主要通过降低体内水分散失和增强吸水能力来实现,前者是“被动”适应方式,是一种避旱和耐旱机制,如通过减小叶面积、叶片数目、气孔密度,增加叶面角质层厚度,产生躲避辐射特征等减少体内水分的散失<sup>[29]</sup>;后者是植物“主动”获取水分的一种适应方式,这方面的系统研究还很缺乏,少量的研究主要集中在个体形态特征适应性改变和根系的可塑性方面,例如,多年生旱生灌木通过增大根/冠比来吸取深层土壤水分<sup>[30]</sup>,一些植物还可以利用叶片粘液吸收大气水汽<sup>[31]</sup>. 在干旱地区,植物的避旱和耐旱性不能从根本上解决水分短缺问题,因而揭示植物主动适应环境获取水分的途径和发展其基本理论具有重要的科学意义和实践价值. 目前有关植物主动适应水分胁迫的理论还很少,作者结合多年实验和前人研究,初步提出干旱地区植被水分聚集适应理论,阐述旱生植被的水分聚集类型及对水分胁迫的适应机制,更好地理解旱生植物与环境之间的相互作用和耦合关系,可为干旱区植被恢复和建设提供理论支撑和实践指导.

干旱地区植被的水分聚集适应理论是指植物为了主动适应干旱和水分胁迫环境,通过改变植物个体形态、群落和景观空间分布格局获取水分的一种自我适应方式,在植株冠层结构和空间分布上形成一

种有效的水分收集和利用系统,在时间和空间上对水分具有自我组织和调控功能,能提高水分利用效率和增强生态系统稳定性,是一种优化的水分分配与高效利用系统.

植被的水分聚集系统具有以下特点:

(1) 完整的自集水系统: 具有明显的汇水、存水和用水环节,受植物种类、水分来源、土壤性质和气候等因素影响.

(2) 水分在景观格局上具有“源”、“汇”镶嵌分布特征.

(3) 水分聚集在不同尺度表现形式不一,在单株植物、坡面、流域上具有不同表现形式和水分聚集效应.

### 2.2.1 树干茎流水分聚集系统

树干茎流是指树冠截留的降雨经叶片和树枝沿树干流向根部土壤的雨水. 树干茎流的形成过程实质是植物的自我集水过程,树冠和茎杆的几何结构就像漏斗一样能将雨水收集并直接运送和贮存到植物根部土壤(图 2(a)). 树冠是“集水面”,茎杆是“输水管”,土壤是“蓄水库”. 树干茎流形成过程也是养分的自然富集过程,树干茎流携带着丰富的养分聚集到根际区,可提高养分的利用效率<sup>[32]</sup>.

树干茎流的水分聚集功能和效应表现在: (1) 它能够改变降水的空间分布格局,使较大面积冠层的降水聚集在面积较小的树干根部,形成根部“水分

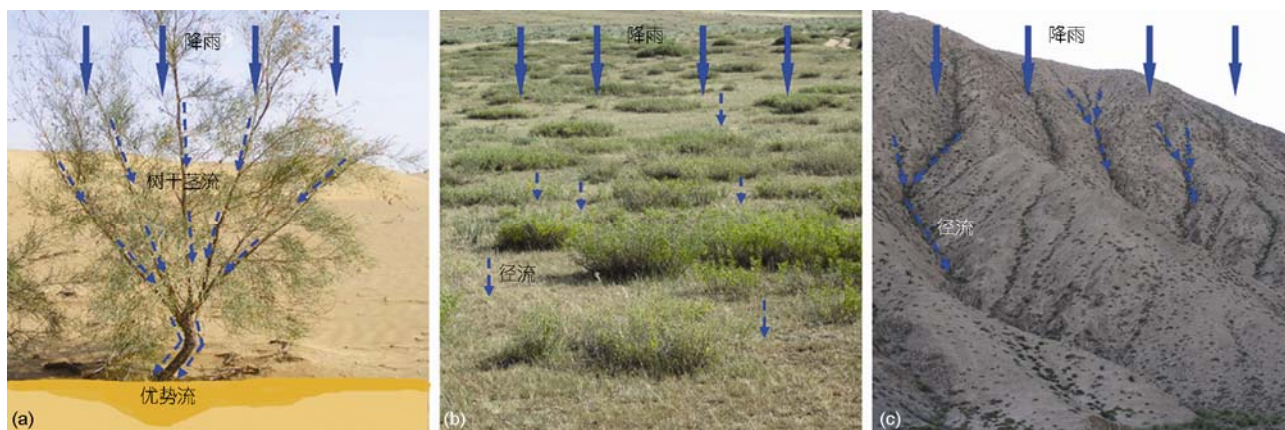


图 2 干旱地区植被水分聚集系统

(a) 单株灌木树干茎流水分聚集系统: 降雨沿树干汇集到根部, 并以优势流形式运移到深层土壤; (b) 灌丛斑块水分聚集系统: 裸地(或草地)斑块的径流汇集到小叶锦鸡儿灌丛, 增加了灌丛斑块土壤水分, 形成自组织的灌丛和裸地镶嵌分布的景观; (c) 沟道水分聚集系统: 径流汇集到沟道, 植被也聚集生长在沟道. 实线箭头指降雨, 虚线箭头指径流

岛”；(2) 树干茎流通过根孔大孔隙优势流快速运移到深层土壤，显著提高根部土壤水分含量，减少土壤蒸发，延长水分保持时间，提高水分利用效率<sup>[32]</sup>。荒漠灌木的丛状树冠结构比热带、亚热带和暖温带森林树种在树干茎流形成方面更具有优势，在热带、暖温带和干旱区，树干茎流百分数的最大值分别为 3.5%、11.3% 和 19%<sup>[33]</sup>。荒漠灌木体形和叶片较小，树皮较光滑且有蜡质层，在小于 2 mm 降雨条件都可以形成树干茎流。柠条、红砂、沙柳等旱生优势灌木树干茎流可使根部单位面积接收的降雨比空地增加 25~150 倍，土壤湿润锋增加 1.2~4.5 倍，土壤水分含量提高 10%~140%，可为灌木在受干旱胁迫时提供水分<sup>[33,34]</sup>。以色列海法大学 Lev-Yadun 等<sup>[35]</sup>发现以色列沙漠地区的大黄植物(*Rheum palaestinum*)的叶子表面形态结构具有很好的聚水功能，在 75 mm 年降水量条件下，大黄聚集到根部的水量能达到 426 mm。表 1 列举了干旱半干旱区不同灌木树干茎流的水分聚集率在 11~221 之间，表明通过灌木树干茎流的聚集作用，根部土壤收集到的水分是当地降雨量的 11~221 倍，这些聚集的水分可使植物在水分胁迫时使用，体现了树干茎流水分聚集是灌木对于干旱环境的一种主动适应形式和高效用水策略。

2.2.2 灌丛斑块水分聚集系统

在干旱地区，植被稀疏，在空间上常形成灌丛和裸地(或草地)斑块镶嵌分布的地貌景观(见图 2(b))。裸地主要由结皮、微生物(地衣、苔藓等)和低矮草本植物组成<sup>[40]</sup>。Valentin 和 Herbes<sup>[41]</sup>认为灌丛斑块格局实质是一个有效的自然集水系统，裸地斑块相当于集水面，为局地径流形成区，灌丛斑块相当于水分汇集区，能够截获和保存雨水径流及营养物质。裸地由于受雨滴的打击作用，土壤表面易形成结皮，因此水分入渗能力减少而径流增大，成为灌丛斑块的水分“源”；植物冠层能减弱雨滴对于土壤表面的冲击，可保护土壤自然结构，灌丛下的凋落物以及根系大孔隙有利于水分下渗，使裸地径流能在灌丛斑块渗透，成为植被斑块水分的“汇”。Howes 和 Abrahams<sup>[42]</sup>认为通过裸地径流汇入灌丛斑块的水量占总渗入量的 3%~20%。在澳大利亚和尼日尔的半干旱区，植被斑块接收的水量是当地降水量的 2~4 倍<sup>[43]</sup>。图 3 为我们在内蒙古太仆寺旗退化草地(图 2(b))监测的小叶锦鸡儿灌丛斑块和其临近裸地斑块土壤水分变化图，可以看出灌丛斑块土壤水分在表层 10~20 cm 稍低于裸地斑块，而在 40~100 cm 土层远高于裸地斑块，说明灌丛斑块能把水分聚集到深层土壤，供干旱缺水

表 1 几种灌木的树干茎流占降水的百分数和水分聚集效应

| 来源                                     | 研究地点                                       | 年降水量(mm)                                         | 树种                              | 树干茎流百分数(%) | 水分聚集率 <sup>a)</sup> |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|------------|---------------------|
| Navar <sup>[36]</sup>                  | Linares<br>(墨西哥)                           | 230                                              | <i>Diospyrus texana</i>         | 3.1        | 58                  |
|                                        |                                            |                                                  | <i>Acacia farnesiana</i>        |            | 11                  |
|                                        |                                            |                                                  | <i>Prosopis laevigata</i>       |            | 11                  |
| Carlyle-Moses <sup>[37]</sup>          | Sierra Madre Oriental<br>Mountain<br>(墨西哥) | 635                                              | Matorral community              | 8.5 ± 1.9  | 21                  |
| 杨志鹏等 <sup>[38]</sup>                   | 毛乌素沙地<br>(中国)                              | 395                                              | <i>Salix psammophila</i>        | 6.4 ± 1.7  | 69                  |
|                                        |                                            |                                                  | <i>Artemisia sphaerocephala</i> | 2.8 ± 1.2  | 42                  |
| Li 等 <sup>[34]</sup>                   | 黄土高原<br>(中国)                               | 263                                              | <i>C. korshinskii</i>           | 7.2        | 154±66              |
|                                        |                                            |                                                  | <i>R. soongorica</i>            | 3.7        | 53±26               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>T. ramosissima</i>           | 2.2        | 25±15               |
| Garcia-Estringana<br>等 <sup>[39]</sup> | 地中海                                        | 模拟降雨(雨强 13<br>mm h <sup>-1</sup> , 降雨时<br>间 1 h) | <i>D. pentaphyllum</i>          | 21 ± 4.1   | 200±109             |
|                                        |                                            |                                                  | <i>M. strasseri</i>             | 3.8 ± 0.9  | 97±31               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>C. arborescens</i>           | 17.3 ± 3.7 | 134±24              |
|                                        |                                            |                                                  | <i>R.sphaerocarpa</i>           | 9.7 ± 2.9  | 67±27               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>C. ladanifer</i>             | 5.6 ± 3.3  | 30±30               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>C.albidus</i>                | 20.8 ± 7.7 | 194±76              |
|                                        |                                            |                                                  | <i>R. officinallis</i>          | 23.2 ± 8.2 | 47±43               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>L. latifolia</i>             | 25.7 ± 7.6 | 40±16               |
|                                        |                                            |                                                  | <i>C.zeelandia</i>              | 26.4 ± 7.6 | 221±113             |

a) 水分聚集率是树干基部单位横截面积上的树干茎流量与降雨量的比值,  $F=V/(B \times P)$ ,  $F$  表示水分聚集率,  $V$  表示树干茎流量(L),  $B$  表示树干基部的横截面积(m<sup>2</sup>),  $P$  表示降雨量(mm)

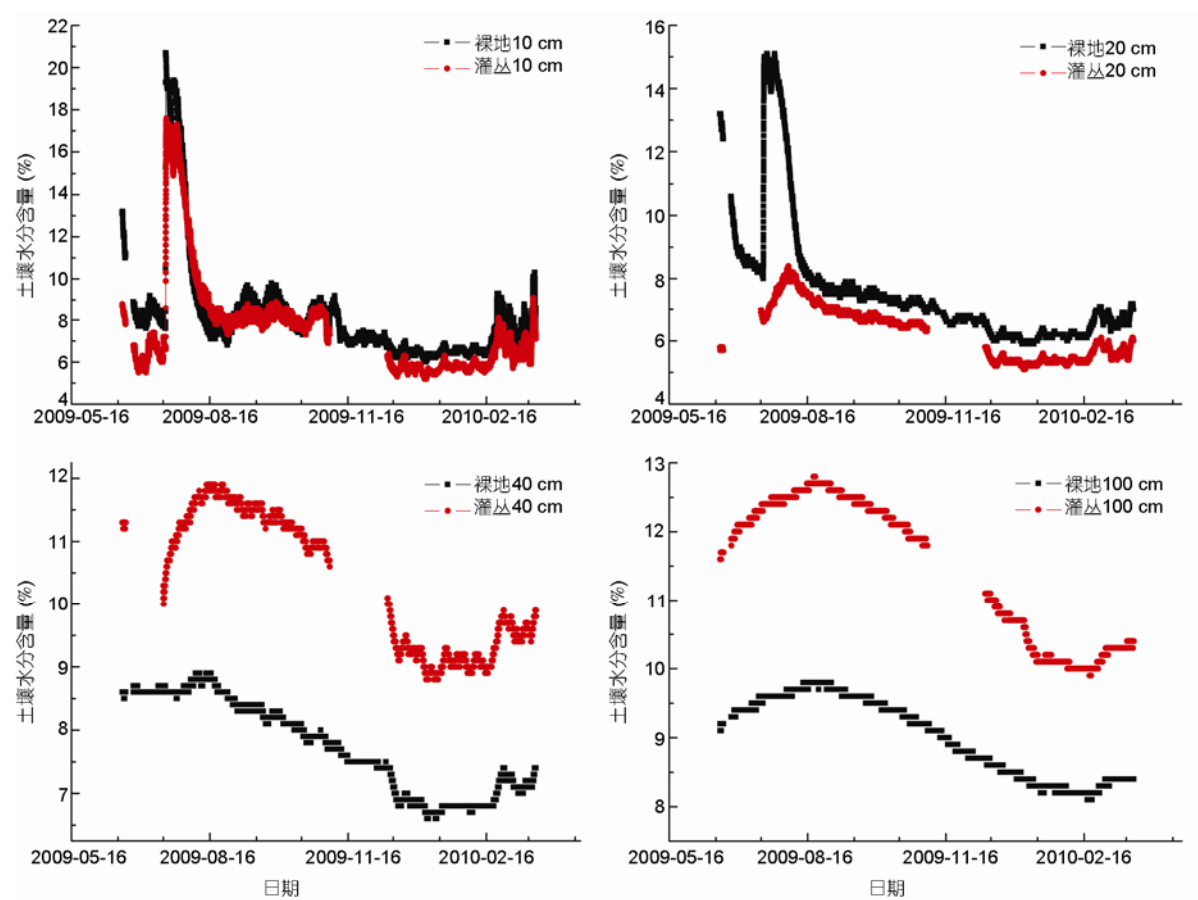


图 3 内蒙古退化草地小叶锦鸡儿灌丛斑块和裸地斑块不同土层深度土壤水分变化特征  
图中断线为数据缺失

使用。灌丛斑块分布格局形成的内在机理是水分聚集及其水分和养分的高效利用<sup>[44]</sup>，灌丛斑块也被称为肥力岛(fertile island)或资源岛(resource island)<sup>[44,45]</sup>，它比裸地斑块具有更高的土壤有机质、微生物活性、持水性、植物蒸腾量和初级生产力<sup>[15,46,47]</sup>。

裸地斑块和植被斑块的面积比降水波动具有一定的自我适应性调控能力，裸地斑块与灌丛斑块在空间上的宽度之比随着年降雨量的增大而减小(图 4)<sup>[48]</sup>，表明在低降水区，灌丛需要更大面积的裸地提供径流以满足水分需求。Kefi 等<sup>[49]</sup>认为植被斑块的个数和大小之间遵从幂函数关系，放牧等人类扰动活动可使植被斑块分布状态偏离这种关系。随着降水量减少和人类干扰加剧，植被斑块形状趋向由条带状向点状转变，当降水低于一定阈值，点状向裸地发展，将可能发生不可逆转的突变，形成类似沙漠景观<sup>[50]</sup>。灌丛斑块水分聚集系统是植被在干旱缺水条

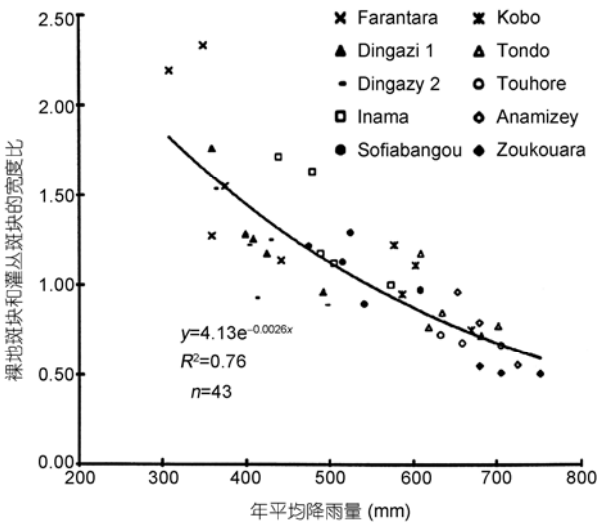


图 4 年降雨量对灌丛斑块水分聚集系统中裸地和灌丛斑块大小比值的影响  
不同符号代表不同区域，此图摘自文献<sup>[48]</sup>

件下对生存环境的自我调节和适应的另一种表现形式, 它可以作为生态系统响应气候变化或人类活动产生突变的“指示器”, 灌丛斑块的破碎和消亡指示着荒漠化程度加剧, 而新斑块的形成则对应着荒漠化进程的减缓<sup>[49-51]</sup>。

### 2.2.3 沟道河网水分聚集系统

在坡面和流域上, 径流在汇流过程中形成网状或树枝状分布的沟道和河网系统, 沟道和河岸通常是水分流经和聚集的地方, 也是植被聚集分布的区域。在干旱地区山坡的阳坡, 植被常沿沟道形成树枝状条带分布格局(图 2(c))。Caylor 等<sup>[52,53]</sup>在美国 Rio Salado 河流域的研究表明土壤水分是决定植被在河网水系中分布格局的主要因素, 植被和沟道及河网水系在空间分布上具有很大的-致性, 揭示了植被在沟道和河网自组织的分布格局是植物对水分胁迫的一种自我适应, 是水分优化利用的空间表达<sup>[53]</sup>。沟道和河网本身是一个天然集水系统, 是降水、地表水和地下水的汇集区域, 土壤水分含量较高, 是流域中的“湿地”, 是植物生长的理想地方, 因此沟道河网水分聚集系统是干旱地区植物在坡面和流域尺度上的一种自我适应用水策略。有关流域河网水系结构与植被分布的耦合与适应机理研究非常少, 尤其地下径流的自组织空间分布规律还不清楚<sup>[54]</sup>, 它是否与植被分布格局存在某种联系还需深入研究。

### 2.2.4 水分聚集适应理论对干旱地区生态恢复的启示

树干茎流、灌丛斑块和沟道河网水分聚集系统, 可分别代表单株植物、斑块和坡面及流域尺度上植物通过水分聚集的响应, 来适应干旱缺水环境的高效用水策略和水分优化利用方式。系统学理论认为聚集运动能够增加系统的物质和能量, 是保证系统由小到大, 由无序到有序, 由简单到复杂, 由低级到高级运动的必要条件<sup>[55]</sup>。聚集理论在经济学方面研究

较多, 例如产业聚集, 即在地理上形成集中的相互联系和相互支撑的产业群的现象, 使得技术、信息、人才、政策以及相关产业要素等资源得到充分共享, 大大提高整个产业群的竞争力。同样的, 干旱地区植物通过水分聚集效应能大大提高对水分胁迫的抵抗能力而适应干旱环境。水分聚集适应理论还需要进行系统深入研究, 以水分聚集为思路研究植物的抗旱适应机理可为植被有效适应气候变化提供理论基础, 也可指导干旱地区植被恢复与生态环境建设, 例如根据树干茎流水分聚集系统选择具有聚水功能的树种, 根据灌丛斑块水分聚集系统确定不同降水区适宜的造林密度, 避免高密度造林形成小老头树和土壤干层问题; 根据沟道河网水分聚集系统确定合适的植树地形部位。水分聚集适应理论还可以应用到我国的退耕还林(草)生态工程建设中, 可通过不同降水区地貌和植物种群结构的水分聚集效应研究, 进一步优化植被配置模式, 提高退耕还林(草)生态功能的稳定性和持续性。

## 3 展望

土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制是研究陆地表层不同圈层相互作用和科学解释陆地表层复杂系统的重要关键科学问题之一, 是一个极其复杂的多学科交叉问题, 需要采用先进的科研仪器和技术方法, 加强土壤学、水文学、生态学和地貌学等学科的交叉与融合研究。未来研究需要加强以下几方面的整合研究: (1) 地上过程与地下过程, (2) 植被退化过程与恢复过程, (3) 自然过程与人为扰动过程, (4) 不同时间尺度和空间尺度, (5) 多尺度和多要素综合观测与模拟。干旱区植物在长期适应干旱环境的演化过程中形成了独特的水分利用方式, 在全球变暖背景下, 需要深入系统地进行植被水分聚集适应理论与高效用水策略研究, 从微观和宏观上揭示干旱地区植被对气候变化的响应与适应机理, 提出生态建设的植被适应性保护与管理对策。

**致谢** 两位审稿人提出了建设性修改意见, 特此致谢。

## 参考文献

- 1 National Research Council. Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington DC: National Academy Press, 2001

- 2 Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141: 211–220
- 3 Caldwell M M, Dawson T E, Richards J H. Hydraulic lift: Consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 1998, 113: 151–161
- 4 Scholz F G, Bucci S J, Hoffmann W A, et al. Hydraulic lift in a Neotropical savanna: Experimental manipulation and model simulations. *Agric For Meteorol*, 2010, 150: 629–639
- 5 Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geosci*, 2010, 3: 100–104
- 6 Ryel R J, Ivans C Y, Peek M S, et al. Functional differences in soil water pools: A new perspective on plant water use in water-limited ecosystems. *Prog Bot*, 2008, 69: 397–422
- 7 Hopmans J W, Bristow K L. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. *Adv Agron*, 2002, 77: 103–183
- 8 Young M H, Robinson D A, Ryel R J. Introduction to coupling soil science and hydrology with ecology: Toward integrating landscape processes. *Vadose Zone J*, 2010, 9: 515–516
- 9 Lin H S. Hydropedology: Bridging disciplines, scales, and data. *Vadose Zone J*, 2003, 2: 1–11
- 10 Newman B D, Wilcox B P, Archer S R, et al. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resour Res*, 2006, 42: W06302
- 11 李小雁, 马育军. 水文学土壤学: 一门新兴的交叉学科. *科技导报*, 2008, 26: 78–82
- 12 Yair A. Spatial variability in runoff in semiarid and arid areas. In: Rubio J L, Calvo A, eds. *Soil Degradation and Desertification in Mediterranean Environments*. Geoforma Ediciones: Logrono, 1996. 71–90
- 13 Mayor A G, Bautista S, Bellot J. Scale-dependent variation in runoff and sediment yield in a semiarid Mediterranean catchment. *J Hydrol*, 2010, 397: 128–135
- 14 Bergkamp G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 1998, 33: 201–220
- 15 Wilcox B P, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. *Ecol Monogr*, 2003, 73: 223–239
- 16 Lin H S. Earth's Critical Zone and hydropedology: Concepts, characteristics, and advances. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2010, 14: 25–45
- 17 Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J Hydrol*, 1982, 55: 3–23
- 18 Brown A E, Zhang L, McMahon T A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J Hydrol*, 2005, 310: 28–61
- 19 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16: 474–480
- 20 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. *水利学报*, 2010, 41: 1142–1149
- 21 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. *地球科学进展*, 2010, 25: 673–681
- 22 Vereecken H, Kollet S, Simmer C. Patterns in soil-vegetation-atmosphere systems: Monitoring, modeling, and data assimilation. *Vadose Zone J*, 2010, 9: 821–827
- 23 李新, 程国栋, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 4: 流域观测系统. *地球科学进展*, 2010, 25: 954–964
- 24 李锋瑞, 刘继亮. 干旱区根土界面水分再分配及其生态水文效应研究进展与展望. *地球科学进展*, 2008, 23: 698–706
- 25 邵麟惠, 于应文, 张德罡. 灌木抗旱机理研究. *草业科学*, 2007, 24: 22–27
- 26 许皓, 李彦. 3 种荒漠灌木的用水策略及相关的叶片生理表现. *西北植物学报*, 2005, 25: 1309–1316
- 27 慕自新, 张岁岐, 梁爱华, 等. 玉米整株根系水导与其表型抗旱性的关系. *作物学报*, 2005, 31: 203–208
- 28 刘峨峨, 汪沛红, 郭振飞. 植物的抗旱诱导蛋白. *植物生理学通讯*, 2001, 37: 155–160
- 29 Oppenheimer H R. Adaptation to drought: Xerophytism. In: *Plant Water Relationships in Arid and Semi-Arid Conditions*. Paris: UNESCO, 1960. 105–138
- 30 李彦, 许皓. 梭梭对降水的响应与适应机制——生理、个体与群落水平碳水平衡的整合研究. *干旱区地理*, 2008, 31: 313–323
- 31 Zimmermann D, Westhoff M, Zimmerman G, et al. Foliar water supply of tall trees: Evidence for mucilage-facilitated moisture uptake from the atmosphere and the impact on pressure bomb measurements. *Protoplasma*, 2007, 232: 11–34
- 32 Li X Y, Yang Z P, Li Y T, et al. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: Stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, 13: 1133–1144
- 33 Levia D F, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and

- agricultural ecosystems. *J Hydrol*, 2003, 274: 1–29
- 34 Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. *Agric For Meteorol*, 2008, 148: 1501–1507
- 35 Lev-Yadun S, Katzir G, Neeman G. *Rheum palaestinum* (desert rhubarb), a self-irrigating desert plant. *Naturwissenschaften*, 2009, 96: 393–397
- 36 Navar J. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *J Hydrol*, 1993, 145: 165–190
- 37 Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *J Arid Environ*, 2004, 58: 181–202
- 38 杨志鹏, 李小雁, 刘连发, 等. 毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征. *科学通报*, 2008, 53: 939–945
- 39 Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *J Hydrol*, 2010, 389: 363–372
- 40 Aguiar M R, Sala O E. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Tree*, 1999, 14: 273–277
- 41 Valentin C, Herbes J M. Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena* 1999, 37: 231–256
- 42 Howes D A, Abrahams A D. Modeling runoff and runoff in a desert shrubland ecosystem, Jornada Basin, New Mexico. *Geomorphology*, 2003, 53: 45–73
- 43 Valentin C, Tongway D J, Seghieri J. Banded landscapes: ecological developments and management consequences. In: Tongway D J, Valentin C, Seghieri J, eds. *Banded Vegetation Patterning in Arid and Semiarid Environments*. New York: Springer, 2001. 228–243
- 44 Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 169–187
- 45 Rango A, Tartowski S L, Laliberte A, et al. Island of hydrologically enhanced biotic productivity in natural and managed arid ecosystems. *J Arid Environ*, 2006, 65: 235–252
- 46 Puigdefábregas J, Sánchez G. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semiarid slopes. In: Anderson M G, Brooks S M, eds. *Advances in Hillslope Processes*. Chichester: Wiley, 1996. 1027–1067
- 47 Newman B D, Breshears D D, Gard M O. Evapotranspiration partitioning in a semiarid woodland: Ecohydrologic heterogeneity and connectivity of vegetation patches. *Vadose Zone J*, 2010, 9: 561–572
- 48 Puigdefábregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surf Proc and Land*, 2005, 30: 133–147
- 49 Kefi S, Rietkerk M, Alados C L, et al. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 2007, 449: 213–217
- 50 Rietkerk M, Dekker S C, de Ruiter P C, et al. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, 2004, 305: 1926–1929
- 51 Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 2009, 461: 53–59
- 52 Caylor K K, Scanlon T M, Rodriguez-Iturbe I. Feasible optimality of vegetation patterns in river basins. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L13502, doi: 10.1029/2004GL020260
- 53 Caylor K K, Manfreda S, Rodriguez-Iturbe I. On the coupled geomorphological and ecohydrological organization of river basins. *Adv Water Resour*, 2005, 28: 69–86
- 54 Lin H. Linking principles of soil formation and flow regimes. *J Hydrol*, 2010, 393: 3–19
- 55 张国文. 聚散原理——可持续发展的一般理论. *系统科学学报*, 2006, 14: 52–57