土壤斥水性研究进展

李金涛^{1,2}, 刘文杰¹, 卢洪健^{1,2}

(1 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象。土壤斥水性研究不仅有助于合理评价斥水性对生态环境的影响, 而且能为当前水土流失问题的解决提供新思路。综述土壤斥水性理论的发展轨迹, 展示各主要发展阶段的研究成果, 阐述影响土壤斥水性的主要因子(火、土壤条件、植被因素), 展望土壤斥水性研究的未来发展方向, 以求为国内该方面的研究提供参考。

关键词: 土壤斥水性; 土壤含水量; 火; 土壤质地; 植被状况

中图分类号: S156 P934 文献标识码: A 文章编号: 1003-7179(2010)05-0082-06

Research Advances in Soil Water Repellency

LI Jin-tao^{1,2}, LU Wen-jie¹, LU Hong-jian^{1,2}

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Kunming Yunnan 650223 China
2 Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039 China)

Abstract Water repellency is the hydrophobic property of soil which indicates the physical phenomenon that the surface of soil particles can not or hard to be moistened by soil water. Study on water repellency is not only helpful to assessing the impact of hydrophobic property of soils on ecological environment, but also beneficial to providing soil erosion control with new approaches. The development of water repellency theory and the relevant research achievements at each major development phrases were summarized. The main environmental factors causing soil water repellency such as fire, soil texture, vegetation, etc., were elaborated, and the research development tendency regarding water repellency of soils were prospected so as to be referred by the corresponding studies in the future.

Key words soil water repellency; soil moisture content; fire; soil texture; vegetation status

土壤斥水性是指水分不能或者很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1]。土壤的斥水性降低了地表水的入渗, 加剧了土壤受侵蚀的风险, 增强了土壤水空间分布的不均匀性, 影响地表植被的生长^[2]。一般情况下, 不具斥水性的土壤很容易被雨水湿润, 这源于水分子与土壤颗粒间引力的作用, 而斥水性土壤中因土壤颗粒与水分子间产生相斥作用, 削弱或瓦解了引力的影响, 水分入渗受阻, 此时土壤就表现出斥水现象。把这种阻碍地表水自由入渗的土壤称作斥水性土壤^[3]。

土壤斥水性是一种动态的土壤特征, 它的出现与消亡具有明显的时间和空间变异性^[4]。大多数

试验表明: 在极端干旱地区, 土壤一般表现出较强的斥水性, 随着土壤湿度的增加, 斥水性迅速降低, 甚至完全消失, 而一些试验也证实, 消失斥水性的土壤一旦含水量降低, 其斥水性质还能逐渐恢复或部分^[5]。因土壤含水量随季节呈周期性变化, 因而土壤斥水性表现出明显的时间变异性。

土壤斥水性空间差异源于土壤异质性及地表植被和土壤动物活动的空间差异。不同质地的土壤斥水程度不同, 一般沙质土壤易于产生斥水性, 而结构良好的团粒土壤则不利于斥水性的产生。土壤斥水性空间变异造成土壤中菌环群落现象和

收稿日期: 2010-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(30770368)项目资助; 中国科学院“西部之光”人才计划项目资助。

第 1 作者: 李金涛(1983-), 男, 硕士生, 研究方向: 森林水文学。E-mail: lj@xtbg.org.cn

通信作者: 刘文杰(1969-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 热带森林水文与气象。E-mail: lw@xtbg.org.cn

优先流现象的产生。

菌环群落现象:在高尔夫球场上,经常出现由干枯草皮形成的环状结构。York 研究认为:它是由离心生长的菌类 (*Marasmius oreades*) 活动分解土壤有机物而引起的,菌类簇生于土壤中分解有机物,并产生有毒代谢产物,毒杀地表植被,随着有机质耗尽,细菌的死亡,由于细菌和有机质的分解物均具疏水性,从而导致细菌活动区域内植被枯死。细菌种类、土壤有机质含量是导致斥水性土壤这种环状分布的主要原因^[6]。

土壤优先流现象:优先流是土壤中一种非常普遍的水分和溶质运移形式,它指土壤在整个入流边界上接受补给,水分和溶质绕过土壤基质,仅通过部分土体的快速运移现象^[7]。土壤斥水性空间差异导致斥水性弱的土壤易于水的入渗,且随着土壤湿度的增加其土壤斥水性更弱,而形成水分下渗的通道,水分通过“指状管道”快速渗入土壤内部。

1 土壤斥水性分布与研究概况

土壤斥水性广泛存在于多种气候类型与土壤条件下,其差异只是强度与分布广度的不同^[8],一些地方大面积发生,如澳大利亚南部和西部沙质土壤,有些地方则零星出现且程度轻微。目前对土壤斥水性研究开展较早且研究相对成熟的地区主要集中在美洲、澳洲以及欧洲的以色列等国^[9]。在一个多世纪前美国土壤科学家就注意到了土壤斥水现象,并对斥水性所造成的土壤性质和生态系统功能的变化进行了一些简单的探讨。在 20 世纪 60 年代,澳大利亚科学家注意到斥水性土壤对农作物产量的影响,并着手寻找降低土壤斥水性的方法。土壤斥水性的研究在我国开展较晚,20 世纪 90 年代杨邦杰联合澳大利亚科学家首次对我国农业土壤中的水热模型应用进行了一些探讨^[10]。最近几年我国在斥水性的研究方面略有增加,如吴延磊等比较了 2 种斥水性测定方法的相关性^[11]。刘发林等探讨火灾对土壤斥水性的影响以及陈俊英等对土壤斥水性与含水量变化关系的数学模型的验证^[12-13]。但我国土壤斥水性研究还相当薄弱,对我国各类型土壤斥水性的产生与影响因素的探讨还处于起步阶段。

2 土壤斥水性理论发展过程

2.1 研究的萌芽阶段(20 世纪前—1919 年)

土壤斥水性与土壤有机物种类及其分解程度

相关,尤其是真菌对土壤有机物的降解作用。1837 年 Waring 在真菌分解实验中讨论了菌丝体对土壤水分吸收速率的影响,在研究中描述了一种被称作蘑菇环 (fairy rings) 的奇怪现象。这一现象引起了当时科学界的种种猜测,直到半个世纪后,农业试验站的数据显示出这一现象与土壤湿度密切相关,即增大土壤湿度可有效抑制这种现象的发生,才有了较为科学的认识。这是土壤斥水性现象的首次描述^[14]。

虽在 20 世纪前,没有出现明确的土壤斥水性定义,但许多早期的研究已经注意到了土壤的这种斥水性质。在 20 世纪初期,Schreiner 和 Shorey 在加尼福尼亚开展了一系列判定土壤有机质化学组成的实验,在调查腐殖质的提取物时提到,他们研究的是一种“不能被雨或来自地表的雨水或灌溉水湿润的土壤”,这是第一次明确的土壤斥水性概念表述。在随后的 10 年间,土壤研究逐步从肤浅的表性认识深入到土壤内部结构物理性质的探索,人们对土壤物理性质认识的加深为更好的理解土壤斥水性及斥水性的形成机制铺平了道路。

2.2 研究初期(1920—1969 年)

20 世纪 20 年代,土壤斥水性周边学科的发展为土壤水分运移过程和土壤可湿性物化描述提供了研究平台。在土壤侵蚀控制的研究中,量化土壤聚集稳定性的研究得到发展,特别是 Kanivetz 和 Waksman 等把土壤有机物和土壤微生物过程引入土壤稳固性的研究,大大扩展了对土壤斥水性的认识。随后 Chids^[15]等利用一种人工合成的高分子电解质明显改善了土壤分子的聚合状态,从而降低了土壤受侵蚀的风险。Molds 和 Algae^[16]发现了一种高效活性剂能够使土壤快速结皮而形成积聚,与此同时在利用微生物分解有机质以增强土壤聚积性研究方面也得到发展。这一时期土壤水分运动的理论与实际应用方面受到关注:理论方面的发展包括毛细管现象的描述,入渗过程中水和土壤接触角的认识,雨水在入渗期间的能量变化以及在多孔介质和 Hele-Shaw 介质中粘滞流的描述等;实际应用方面包括应用集水原理铺设排水管道,在高速公路的建设中利用斥水性土壤的水、热隔绝效应降低土壤水蒸发,提高公路的使用寿命等。

这一时期对土壤斥水性的关注及其理论的发展直接促成了 1968 年第一次国际性土壤斥水性研讨会的召开,会上第一次系统的总结了前期关于土壤斥水性研究的成果,并就土壤斥水性的未来发展

展开广泛的讨论: (1)水在土壤中运动的物理过程; (2)斥水性在不同生态系统的分布; (3)土壤表面活性剂的理论和实际应用(特别是湿润剂的应用); (4)斥水性的影响因素(微生物和森林大火); (5)土壤斥水性等级的测定方法,集水区域以及土壤侵蚀过程等。会议促进了土壤斥水性研究成果的交流,为土壤斥水性理论的进一步发展奠定了基础。

2.3 研究的快速发展阶段(1970—)

20世纪70年代后土壤斥水性研究的相关传统方向(斥水性的改良,火产生的斥水性,土壤集水等)继续发展^[17]。同时水分在斥水性土壤中运移的水动力学研究也获得了实质性进步,最主要的表现就是土壤入渗和优先流理论的发展。Staffan^[18]描述了在Hele-Shaw土壤中的指状流现象,扩展了土壤水在斥水性土壤中指状流的概念。Hille和Baker^[19]则发展了分层土壤的指状流理论,它丰富了在二维的、均质的、不饱和多空介质中指状流的理论。同时斥水性土壤系统中优先流动力学^[20],指状流对溶液在土壤中运移的贡献以及水流通过大空隙土壤的运动过程等也得到迅速发展^[21]。

随着90年代社会环境意识的觉醒,化学污染物在斥水性土壤中的迁移过程受到广泛关注:Selker等评估了优先流对污染物在土壤中运移的影响,显示优先流明显加速了土壤中污染物的扩散速率;Quisenberry等则利用化学物质和水的运移信息,发展了一种反映这种过程的土壤分级系统。在流域水文响应方面,研究主要集中在森林火和土壤湿度对流域水文的影响以及土壤斥水性造成的土壤侵蚀方面^[22]。Jungerius等^[23]在荷兰沿海沙丘中证实,在没有火干扰的条件下,斥水性增加了土壤的侵蚀。

1998年第二次国际土壤斥水性会议在荷兰瓦赫宁厄召开。会上依据环境友好型和可持续利用方式管理斥水性土壤生态系统的要求,提出一系列焦点问题: (1)土壤斥水性发生范围以及不同气候、土地利用和土壤含水量对土壤斥水性的影响; (2)土壤数据库中斥水性信息的整合问题; (3)斥水性的产生以及地表植被对斥水性的影响程度; (4)如何通过简单且易于操作的工具来预测水流和溶质流在均匀或非均匀性分布土壤中的运移路径; (5)如何应用改良技术解决农业土壤中因斥水性土壤产生的环境退化和减产问题,及各种改良方式的应用前景等。

近10年来生态环境面临严重恶化,土壤斥水性研究加速发展,大批研究成果见诸报端:斥水性土

壤测定方式的探索^[24-25];土壤斥水性的量化和预测方面的研究^[26];斥水性土壤产生的生态问题及其影响^[8,10];以及土壤斥水性解决途径的探讨等^[27]。

3 影响土壤斥水性的因素

3.1 土壤斥水性的干扰因素

火是土壤斥水性各干扰因素中最为关键的因素之一,火后留下的燃烧物改变了土壤的物质构成^[28]。因此,根据火产生的热量、燃烧时间、土壤类型以及燃料的种类与质量等可以调节和控制火对土壤斥水性的产生、增强、破坏等相应作用^[29]。

火产生的土壤斥水性研究较早,在1961年第一次国际土壤斥水性会议上就出现了关于斥水性与火相关关系的报告,随后对火产生的斥水性研究在世界各地广泛展开,尤其是近20年来。Robichaud^[30]等在实验室中通过控制不同火强,研究土壤斥水性对火的反应,结果表明:在土壤湿度和土壤质地相同的条件下,土壤斥水性与火强呈正相关关系。DeBano^[31]则描述了火产生土壤斥水性过程中土壤热量的传导与高温所产生的斥水性物质的形成、蒸发、冷凝过程的传递机制,论述了火在土壤斥水性产生过程中所起的重要作用。而Robichaud^[32]则通过对比美国北部山地森林土壤火干扰前后入渗率的变化发现,土壤经森林大火后入渗率下降了10%~40%。Cristina Rulli等则研究了火产生的斥水性对水土流失的影响,认为在相同湿度条件下火干扰后土壤流失率是其6年后的土壤流失率的60倍。火对斥水性的影响因地表植被的差异而不同,Arcenegui等^[29]认为,火明显增强了土壤斥水强度,但不同植被下土壤产生斥水性强度差异明显,一般在松林下的土壤斥水性较强,矮生植物下土壤的斥水程度较弱。这可能是由不同植被燃烧物组成差异造成的。

火对斥水性的影响表现在土壤聚合状态的改变方面,Arcenegui认为,火可以明显增强土壤的聚合性,这也是火影响土壤水文行为的主要途径。然而Doerr^[33]却得出相反的结论,火破坏了斥水性土壤层的聚合结构,深度达5cm,而在这层土壤下,斥水性与火强是呈负相关关系的。火对斥水性的影响主要是通过间接途径实现,到目前对于火对斥水性的影响机制的研究仍不十分透彻。

3.2 影响土壤斥水性的土壤条件

土壤斥水性的产生与土壤颗粒大小、物质组成、有机质含量及其种类、含水量、土壤结构以及pH

等因素有关。土壤斥水性的产生是各种土壤因子与其外部环境相互作用的结果。

许多研究探讨了土壤因子在土壤斥水性形成过程中的作用。如澳大利亚研究者发现沙质土壤最容易产生斥水性,且土壤粘土含量的微小变化就能导致斥水性强度的较大波动^[34]。Robichaud等^[30]推测其可能是因为沙质土壤中其颗粒粒径与其他类型土壤比较偏小,而更容易被等量斥水性物质包裹。研究表明这些斥水性物质主要来源于土壤有机物的生化分解^[35]。Home^[36]通过萃取实验分离出了产生斥水性的此类物质,同时得出土壤斥水性的产生与有机物最外层物质的组成和化学性质密切相关,特别是两性化学物质。Pardini等^[37]发现欧石楠能够向土壤提供一种有机酸化合物,该化合物对土壤矿化和有机酸化过程中有机无机复合体的形成至关重要。

土壤 pH 对斥水性的影响在不同地区不同植被之间差异较大。Mataix-Solera等^[38]在地中海气候下研究 *Q. coccifera* 和 *P. halepensis* 下土壤斥水性发现:土壤 pH 与土壤斥水性并无明显关系。而 McGhie 和 Posner^[39]则发现在桉树下土壤斥水性随土壤 pH 降低而减弱,这可能与桉树林下酸性土壤环境更有利于斥水性物质的生成或有机酸物质活性增强有关。Lin等^[40]在实验中发现,有机物与水接触角度对 pH 的依赖性,增加土壤 pH 能够明显降低有机酸物质的斥水性。Ortega等^[41]认为,土壤 pH 对斥水性影响主要通过土壤中细菌、真菌等微生物间接途径来实现,土壤酸碱性是菌等微生物丰富度和分布的主要原因之一。

土壤含水量是斥水性研究中较早涉及的土壤因子之一。Taumer等^[26]对柏林地区土壤斥水性受土壤含水量和有机质含量影响的研究发现,两者之间存在显著的相关关系,可以通过土壤含水量和土壤有机质量为参数的线性方程来预测斥水性的发生强度,虽然实验没能更深入的探讨其他因子(土壤类型、颗粒大小、土壤紧实度等)对斥水性的影响,但通过与测定数据的比较看其结果基本符合实际。

土壤空隙和土壤颗粒度是斥水性研究中的重要参数。坚实的土壤,土壤颗粒排列紧密,土壤孔隙被压缩,土壤吸收水分的能力大幅降低,且结构紧实的土壤减少了土壤内部空气的运动,水分很难通过狭小的空隙自由流动,也一定程度上阻碍了水分的入渗^[42]。Rodríguez-Arlleres等^[43]研究土壤颗粒

大小对斥水性的影响发现,在草地等植被下即使不具有斥水性的土壤,当土壤颗粒度小于 0.005 mm 时也表现出一定的斥水性。

3.3 影响土壤斥水性的植被条件

许多野外实验证实,植物枯落物与根活性是土壤斥水性产生的 2 个最主要因素^[44]。植物的凋落物因种类不同,含有不同成分和含量的有机化合物,这些有机质在细菌、真菌等微生物的作用下发生化学变化产生具有斥水性的物质或其本身就具有斥水的性质。根活性则主要表现在地表植被与土壤接触的生化过程中,根的生长与周围土壤物质和能量的交换改变了土壤的物理和化学性质,从而影响土壤的斥水性。但就目前的研究看,植被因素是否真的能够直接造成土壤斥水性的产生以及斥水性物质输入机制依然不清楚^[45]。

地表植被及其凋落物是土壤斥水性物质的输入源头,不同植被类型对土壤斥水性的影响不同。Jamison等研究认为,植物生长能够增强土壤的斥水程度,这些植物包括柑橘类,多年生草本,石楠类灌木,松类乔木等,而一般来说在草地和农耕地土壤中斥水性则更为常见。Dekker等^[3]经对荷兰沙质丘陵地带多种植被类型下土壤斥水性研究发现:斥水土壤层厚度随土壤深度递减,且灰发草下斥水性土壤层厚度明显比松类、石楠等植被层薄,并且随土壤深度的增加,斥水性递减速率也最高。Jordan等^[46]研究发现:松林、栓皮栎、桉树下的土壤具有较宽的斥水性等级,这一结果与前期在栎属中土壤的研究结果一致。

4 土壤斥水性的测定方法

土壤斥水性的测定方法多种多样,传统上是通过对土壤颗粒和水分子的接触角(γ)大小来确定土壤斥水性等级,即:当 $\gamma > 90^\circ$ 则认为土壤具有斥水性,相反当 $\gamma < 90^\circ$ 则认为其不具有斥水性。然而由于土壤颗粒很难提供一个供测量的几何平面,因此,直接测量土壤与水的角度几乎是不可能的,当前土壤斥水性的测定一般采用间接方式进行。

最简单应用最广泛的测定方法是滴水穿透时间法(water drop penetration time, WDPT),即用标准滴管滴 5 滴蒸馏水于土样表面,通过测定液滴从土样上消失的时间来确定土壤斥水性大小。一般认为,WDPT 超过 5 s 的土壤具有斥水性,5~60 s 的土壤具有轻微斥水性,60~600 s 的土壤具有较强斥水性,600~3600 s 的土壤有严重斥水性,而超过

3 600 s的则被认为具有极端斥水性^[47]。另一种较为常用的方法是酒精溶液入渗法 (molarity of ethanol droplet MED), 它是间接测定位于土壤表面的液体表面张力的一种方法。一般以渗入土壤到保持在土壤表面临界酒精溶液的表面张力、摩尔浓度或体积百分数作为斥水性的指标。MED测定方法较WDTP法测定速度快, 但测定程序复杂, 而WDTP法的测定有时十分耗时而不易采用, MED法可以弥补WDTP法测量时间过长的不足, 因此, 在现代土壤斥水性的测量中这2种方法应用最为广泛。其他的测量方法还有很多, 如固气表面张力测定法 (solid-air surface tension)、进水压力水头测定方法 (water entry pressure head)和90°表面张力法 (ninety degree surface tension)等, 这些方法因测量过程复杂且不宜控制而较少被采用^[47]。

5 展望

1) 一个多世纪以来, 有关土壤斥水性形成机制及影响因素的研究已相当丰富, 其中对植被类型、温度、土壤含水量、有机质含量、pH等因素关注较多, 然而研究多是探讨与斥水性的关系, 而对斥水性产生的微观机理仍缺乏透析的理解。因此, 今后土壤斥水性研究中应更多引入土壤化学的研究, 从微观角度来解释土壤斥水性产生与变化的机理, 如土壤有机酸结构组成、种类以及土壤颗粒的晶体结构与土壤斥水性的关系等^[48]。

2) 土壤斥水性具有极强的变异性, 即使在很小区域内土壤也往往表现出从不具斥水性到极端斥水性的巨大差异, 而大尺度上土壤斥水性的变异就更大, 但目前就这方面的研究却很少触及, 因此, 流域尺度下土壤斥水性的变化应是今后研究的一个重点。

3) 建立土壤斥水性预测模型, 应用量化的环境因子对土壤斥水性的产生范围与强度预测, 是土壤斥水性研究的一个重要任务, 前期研究中虽然也有一些尝试, 如T_{sum}er等将土壤含水量和土壤有机质与土壤斥水性拟合出一种线性关系, 但影响土壤斥水性的因子太多, 仅以少量的几种因素预测土壤斥水性的发生还远远不够, 通过对土壤输入物质和土壤质地等参数更精确的计算, 并结合土壤水不稳定流理论而构建土壤斥水性的预测模型是今后土壤斥水性研究中一个值得考虑的方向^[26]。

4) 我国土壤斥水性研究相对薄弱, 虽然近年来也有所涉及, 但研究仅局限在探讨传统因素 (土壤含

水量、火等)对土壤斥水性的影响方面^[10-13], 而更一步的研究却少见报端。我国是一个土壤类型异常丰富, 气候跨度十分广阔的国家, 具有开展土壤斥水性研究的丰富资源, 尤其是近年来我国水土流失、水源污染等问题的出现, 在我国开展土壤斥水性研究就显得更有意义。

[参 考 文 献]

- [1] 杨邦杰, Blackwell P S. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究 [J]. 环境科学, 1993, 15 (4): 88-90
- [2] Ghadin A K. Water repellency: a whole-farm bio-economic perspective [J]. J Hydrol 2000, 231/232: 396-405
- [3] Dekker L W, Ritsma C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent dutch soils [J]. J Hydrol 2000, 231/232: 148-164
- [4] Buczko U, Bens O, Httl R F. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*) [J]. Geoderma 2005, 126: 317-336
- [5] Berglund K, Persson L. Water repellence of cultivated organic soils [J]. Acta Agr Scand B-S P, 1996, 46: 145-152
- [6] York C A, Canaway P M. Water repellent soils as they occur on UK golf greens [J]. J Hydrol 2000, 231/232: 66-75
- [7] Andreini M S, Steenhuis T S. Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage [J]. Geoderma 1990, 46: 85-102
- [8] Ritsma C J, Dekker L W. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications [J]. J Hydrol 2000, 231/232: 308-319
- [9] Roberts F J, Carbon B A. Water repellence in sandy soils of South-Western Australia II: some chemical characteristics of the hydrophobic skins [J]. Aust J Soil Res 1972, 10(1): 35-42
- [10] 杨邦杰. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型 [J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351-359
- [11] 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 35-38
- [12] 陈俊英, 张智韬, Gilleman L, 等. 不同污染程度的水对土壤斥水性的影响 [J]. 节水灌溉, 2009(10): 13-19
- [13] 刘发林, 张思玉. 森林火灾对马尾松次生林土壤斥水性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(4): 38-53
- [14] Deban L F. Water repellency in soils: a historical overview [J]. J Hydrol 2000, 231/232: 4-32
- [15] Martin J P, Waksan S A. Influence of microorgan-

- isms on soil aggregation and erosion [J]. *Soil Sci Soc Am J* 1940, 50: 29– 47.
- [16] Fletcher J E, Martin W P. Some effects of algae and moulds in the rain crust of desert soils [J]. *Ecology* 1948, 29: 95– 100
- [17] DeBano L F, Savage S M. The transfer of heat and hydrophobic substances during burning [J]. *Soil Sci Soc Am J* 1976, 40: 779– 782
- [18] Saffman P G. Viscous fingering in hele shaw cells [J]. *J Fluid Mech* 1986, 173: 73– 94
- [19] Ritsma C J, Dekker L W. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil [J]. *Water Resour Res* 1998, 34: 555– 567
- [20] Bauder T W, Dicarlo D A. Preferential flow in water repellent sands [J]. *Soil Sci Soc Am J* 1998, 62: 1185– 1190
- [21] Mallants D, Jacques D, Vanclooster M, et al A stochastic approach to simulate water flow in a macroporous soil [J]. *Geoderma* 1996, 70: 299– 324
- [22] Scott D F. The contrasting effects of wildfire and clearfelling on the hydrology of a small catchment [J]. *Hydrological Processes* 1997, 11: 543– 555
- [23] Witter J V, Jungerius P D. Modelling water erosion and the impact of water repellency [J]. *Catena* 1991, 18: 115– 124
- [24] Badmann J, Ellis A, Hartge K H. Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 66– 75
- [25] Scott D F. Soil wettability in forested catchments in south africa as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 87– 104
- [26] Tümer K, Stoffregen H. Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content [J]. *Geoderma* 2004, 125: 107– 115
- [27] Franco C M M, Michelsen P P. Amelioration of water repellency: application of slow-release fertilisers to stimulate microbial breakdown of waxes [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 342– 351
- [28] 田昆. 火烧迹地土壤磷含量变化的研究 [J]. *西南林学院学报*, 1997, 17(1): 21– 25
- [29] Arcenequi V, Mataix-solera J, Guerrero C, et al Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in mediterranean calcareous soils [J]. *Catena* 2008, 74: 219– 226
- [30] Robichaud P R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in northern rocky mountain forest USA [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 220– 229
- [31] DeBano L F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 195– 206
- [32] Robichaud P R, Hungerford R D. Water repellency by laboratory burning of four northern rocky mountain forest soils [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 207– 219
- [33] Doerr H S, Shakesby R A, Blake W H, et al Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response [J]. *J Hydrol* 2006, 319: 295– 311
- [34] Rulli M C, Bozzi S, Spada M, et al Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area [J]. *J Hydrol* 2006, 327: 323– 338
- [35] Zava L M, Gonzalez F A, Jordan A. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain [J]. *Geoderma* 2009, 152: 361– 374
- [36] Home D J, McIntosh J C. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand—extraction, characterisation and proposed mechanisms for repellency expression [J]. *J Hydrol* 2000, 231/232: 35– 46
- [37] Pardini G, Gispert M, Dunj G. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain [J]. *Sci Total Environ* 2004, 328: 237– 246
- [38] Mataix-solera J, Arcenequi V, Guerrero C, et al Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semi arid Mediterranean environment [J]. *Hydrological Processes* 2007, 21: 2300– 2309
- [39] Mcghee D A, Posner A M. The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water repellent soils [J]. *Aust J Agr Res* 1981, 32: 609– 620
- [40] Lin Chao-Yuan, CHOU Wen-Chieh, TSAI Jing-Shyan, et al Water repellency of Casuarina windbreaks (*Casuarina equisetifolia* Forst.) caused by fungi in central Taiwan [J]. *Ecol Eng* 2006, 26: 283– 292
- [41] Ortega A, Lorite J M. Macrofungi diversity in cork-oak and holm-oak forests in Andalusia (southern Spain): an efficient parameter for establishing priorities for its evaluation and conservation [J]. *Cent Eur J Biol* 2007, 2: 276– 296
- [42] Rulli M C, Bozzi S, Spada M, et al Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area [J]. *J Hydrol* 2006, 327: 323– 338
- [43] Rodriguez-alvarez M, Deblas E, Benito E. Estimation of soil water repellency of different particle size fractions in relation with carbon content by different methods [J]. *Sci Total Environ* 2007, 378: 147– 150

- [18] 王克勤, 郭逢春, 贺庭荣, 等. 金沙江干热河谷人工赤桉林群落结构 [J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 37-41, 47.
- [19] Lawton JH, Brown V K. Redundancy in ecosystems [J]. *Ecol Stud Anal Synth*, 1993, 99: 255-279.
- [20] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands [J]. *Nature*, 1994, 367: 363-365.
- [21] Tilman D. Biodiversity population versus ecosystem stability [J]. *Ecology*, 1996, 77: 350-357.
- [22] Johnmnn K H. Biodiversity and the productivity and stability of ecosystem [J]. *Tree*, 1996, 11(9): 372-377.
- [23] 盛连喜. 环境生态学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [24] 傅伯杰, 陈利顶. 干扰的生态学意义 [J]. 生态学报, 1998, 18(3): 351-356.
- [25] Pickett S T A, Kolasa J, Amesto J J et al. The ecological concept of disturbance and its expression at various hierarchical levels [J]. *Oikos*, 1989, 54: 129-136.
- [26] 徐化成. 森林生态与生态系统经营 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 12-13.
- [27] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 10-12.
- [28] 陈灵芝, 陈伟烈. 中国退化生态系统研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [29] MacArthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability [J]. *Ecology*, 1955, 36: 533-536.
- [30] 李景文. 森林生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 164-167.
- [31] Kimmins J P. *Forest Ecology* [M]. New York: Macmillan, 1987: 407-409.
- [32] 莫江明, 彭少麟, Brown S 等. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应 [J]. 生态学报, 2004, 24(2): 193-200.
- [33] 李永庚, 蒋高明, 高雷明, 等. 人为干扰对浑善达克沙地榆树疏林的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 829-834.
- [34] 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 [J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.
- [35] 李根前, 唐德瑞, 赵一庆. 毛乌素沙地中国沙棘平茬更新的萌蘖生长与再生能力 [J]. 沙棘, 2000, 13(4): 9-12.
- [36] 艾训儒. 人为干扰对森林群落及生物多样性的影响 [J]. 福建林业科技, 2006, 33(3): 5-9.
- [37] 蔡秀珠. 人为干扰强度对马尾松人工林生物量及其分配的影响 [J]. 中南林学院学报, 2006, 26(2): 51-54.
- [38] Conway G R. The properties of agro ecosystems [J]. *Agricultural Ecosystems*, 1984, 7, 24(2): 95-117.
- [39] 马兴洲. 辽西地区刺槐人工林稳定性的研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 1986, 17(1): 27-35.
- [40] 王豁然. 论外来树种人工林的可持续经营. 中国林业科学研究院 [M] / 中国林业科学研究院. 面向 21 世纪的林业—可持续发展全球战略下的林业科学技术. 北京: 中国农业出版社, 1998: 121-129.
- [41] 姜凤歧, 曹成有, 曾德慧, 等. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [42] 刘增文, 王乃江, 李雅素, 等. 森林生态系统稳定性的养分原理 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(12): 129-134.
- [43] 周集中, 马世骏. 生态系统稳定性 [M] / 马世骏. 现代生态学透视. 北京: 科学出版社, 1990.
- [44] 丁惠萍, 张社奇, 钱克红, 等. 森林生态系统稳定性研究的现状分析 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 28-30, 61.

(责任编辑 张坤)

(上接第 87 页)

- [44] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. *Earth-Sci Rev*, 2000, 51: 33-65.
- [45] Wang Z, Wu L, Wu Q. J. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability [J]. *J Hydro*, 2000, 231/232: 76-83.
- [46] Jordan A, Martinez-zavala L, Bellinfante N. Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain [J]. *Catena*, 2008, 74: 137-143.
- [47] Letey J, Carrillo M L K. Approaches to characterize the degree of water repellency [J]. *J Hydro*, 2000, 231/232: 61-65.
- [48] Martinez-Zavala L, Jordan-Lopez A. Influence of different plant species on water repellency in Mediterranean [J]. *Catena*, 2009, 76: 215-223.

(责任编辑 赵粉侠)