

砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展

余海龙¹, 黄菊莹²

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学 新技术应用研究开发中心, 银川 750021)

摘要:砂田是利用砾石覆盖地表的典型节水范例, 砾石覆盖对土壤大孔隙的半径、数量、连通性和密度都有重要影响。大孔隙的研究方法可分为直接观测法和间接描述法, 并讨论其适用性和局限性。因为大孔隙及优先流的成因复杂, 应将大量的野外实验和室内实验相结合, 同时改进观测方法。土壤大孔隙研究的最终目的是调控它, 为减少地下水污染、控制养分和水分的流失提供一条新途径。砾石覆盖土壤能增加大孔隙并促进降水入渗, 加快壤中流的发生, 减少径流和抑制蒸发, 改变了土壤水文循环过程, 土壤水文生态功能也随之改变。并指出了砾石覆盖下土壤优先流研究中存在的问题和今后应该加强的研究领域。

关键词:砂田; 砾石覆盖; 大孔隙; 土壤水文过程

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)04-0284-05

Research Progress on Influence of Mulching Gravel and Sand on Soil Macropore Characteristics and Soil Hydrological Process of Gravel-Sand Mulch Field

YU Hai-long¹, HUANG Ju-ying²

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Center of New Technology Application and Research, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Gravel-sand mulch field is a typical case of mulching gravel on land surface to retain water. Gravel-sand mulch field, as a kind of method to prevent drought, can reduce evaporation by artificially laying gravel to form a dry soil layer on soil surface. Soil macropore is the pore offering path for preferential flow. Mulching gravel has important influence on radii, quantity, connectivity and density of soil macropore. The study methods could be divided into two types, direct measurement and indirect description, and the suitability and limitation of the two methods were discussed. Because of the complexity of soil macropore and preferential flow formation cause, the experiments in laboratory should be combined with field trial, and observation techniques should be improved. The final aim of soil macropore research was to reduce groundwater contamination, control the loss of nutrient and water by regulating soil macropore. Mulching gravel can enhance soil macropore and thus facilitate precipitation infiltration and interflow and decrease runoff and evaporation. In that soil hydrological cycle process, its functions were changed respectively. In addition, some existent questions and research field of soil macropore were suggested for the future research.

Key words: gravel-sand mulched field; mulching gravel; macropore; soil hydrological process

砂田是我国西北干旱地区经过长期生产实践形成的一种独有的保护性耕作方法, 是利用砾石覆盖地表的典型节水范例^[1]。砾石指粒径 ≥ 2 mm 的矿物质颗粒^[2]。砂田通过在土壤表面覆盖 10 cm 左右厚的砂砾以改善土壤的各种特性。砂田有相当长的历

史, 主要分布在甘肃省中部、青海省、新疆、宁夏和陕西省的部分干旱地区, 是中国旱作农业生产典型。在干旱半干旱地区, 砾石覆盖可在土体表面形成一个干土层来阻止毛细管水的上升, 减少实际的蒸发^[3-4]。国内外许多学者研究证明砂田具有增温保墒、控制盐

碱化、减轻土壤侵蚀、抑制杂草、减少病虫害、提高作物品质、促进作物生长等优良特性^[5]。世界上其他一些干旱、半干旱区也有砂田分布^[6],如法国的 Montpellier,美国的 Texas、Montana 和 Colorado,瑞士的 Chamoson 以及南非等。土壤中砾石含量对土壤物理特征和水文功能产生不可忽视的作用^[7-8],尤其是对土壤大孔隙特征、渗透及蒸发等有重要影响^[9]。砂砾覆盖能防止土壤表面受到雨滴溅蚀,切断土壤的毛细管作用从而对土壤入渗和蒸发规律产生影响。土壤大孔隙形成的优先流改变了水土交界面的水文过程,增加了水分入渗,降低了地表径流和土壤侵蚀,但同时降低了作物对水和养分利用效率,产生化肥或污染物的渗漏,甚至污染地下水^[10]。因此,研究砂田土壤中大孔隙和优先流特征及其增加入渗、降低产流以及抑制蒸发的机制,对深入理解土壤水分运动的物理过程、提高农业水分利用效率及发展节水农业、降低农业成本、有效控制土壤侵蚀和污染扩散都有极为重要的科学意义和实践价值。表层土壤在水文循环中起着极其重要的作用,降水(灌溉)入渗、径流、蒸发、土壤水的深层渗漏等土壤水文过程都是以土壤表层为介质不断地发生和转化的。国外自 20 世纪 30 年代起就开始对土壤中砾石的重要性进行评价,并对其对水文过程影响展开研究。对于砂田,砾石覆盖增加了地表粗糙度和土壤入渗以致于径流很少发生。因此,相关研究多集中于砾石覆盖对土壤入渗、蒸发规律的影响。综合国内外研究现状及目前研究热点,现从以下三个方面的研究进展进行回顾:砾石覆盖对土壤特性的影响;土壤大孔隙及优先流研究;砾石覆盖对土壤水文过程的影响。

1 砾石覆盖对土壤特性的影响研究进展

土壤中砾石对水文过程的影响主要是通过改变土壤特性如土壤容重、层次结构、孔隙度、土壤含水量和地表土壤结皮等^[11-12]。砾石的存在对土壤容重有较大的影响。Cerdeja 针对砾石覆盖度对土壤容重的影响开展的一系列研究表明,土壤中砾石含量越高,土壤容重就越小。Cerdeja 认为这是由于砾石覆盖增加了砾石下面土壤的有机质含量和阻碍土壤结皮所产生的结果^[13]。但也有研究表明,土壤容重先随砾石含量增加而增加,后又随砾石含量增加而减小^[7]。

砾石覆盖形成的干土层使土体的层次结构发生改变,导致土壤的水分运移特性不同于均质土,层状土壤孔隙结构的不同空间分布通过影响土层含水率、水力梯度和传导度,进而影响水分蒸发和溶质迁移。

相关研究发现,砾石覆盖对土壤大孔隙的半径、

数量、连通性和密度都有重要影响^[11]。Eriksson 等指出砾石能通过影响土壤基质中的大孔隙进而影响其水文特性^[14]。时忠杰等认为砾石对土壤渗透速率的影响可能是通过影响土壤孔隙的大小和数量发挥作用的^[15]。杨忠等的研究结果显示,砾石含量高的土壤的非毛管孔隙度高,通透性较好,是土壤饱和渗透系数高的主要原因^[16]。此外,Valetin 指出土壤中的砾石含量与大孔隙度存在正相关关系^[17],Ingelmo 等进一步解释了土壤—砾石两相界面之间大孔隙的成因^[18],这些研究结果都表明砾石对土壤大孔隙性质有重要影响。但在以往的研究中,很少有对砾石与土壤大孔隙之间关系作出直接的解释,而且以往对土壤大孔隙的研究也多是在土壤质地相对均一的条件下进行的,对土壤中砾石在土壤大孔隙形成中作用的研究还相对缺乏,有必要在典型区域开展研究。土壤中砾石的存在对地表土壤结皮也有影响,Poesen 和 Lavee 研究了砾石在土壤中不同位置对地表结皮的影响^[19],结果表明,对于细沙土,砾石覆盖于地面时,可显著降低地表的土壤结皮强度。

2 土壤大孔隙及优先流研究进展

土壤大孔隙是受干湿交替、冻融变化、根系枯萎、动物活动及人为耕作等因素的影响,在土体内形成使水分和溶质优先迁移的物理孔隙^[20]。大量研究表明,大孔隙普遍存在于自然界的土壤中,虽然仅占土壤体积的 0.1%~5%,但对降水或灌溉水的入渗及溶质运移影响深刻^[21-22]。土壤大孔隙的存在,使进入土壤中的水分形成优先流(preferential flow),绕过土壤基质,快速到达土壤深层或补给地下水,土壤水分运移过程不再符合均一介质下的 Darcy 定律^[23]。大孔隙所形成的优先流成为土壤深层水分的唯一可能来源。

20 世纪 80 年代以来,土壤大孔隙结构和优先流现象逐渐成为土壤物理学、生态水文学和水文土壤学的研究热点,对土壤大孔隙和优先流运动的定义、试验观测、成因分析及溶质运移过程的模拟持续开展。土壤大孔隙的定义是研究大孔隙形态结构和功能的基础,但目前关于土壤大孔隙的定义仍有分歧^[24]。例如,Luxmoore 等把土壤大孔隙假设为毛管状,将毛管势大于一 300 Pa,当量孔径在 1 mm 以上的孔隙定义为大孔隙^[25]。根据流速的差异,Skopp 认为大孔隙是可以提供优先水流路径的团聚体间孔隙,土壤胀缩形成的裂隙、根孔及动物孔穴^[26]。从流体动力学的角度,Beven 将土壤大孔隙界定为能传导非平衡管道水流的非毛管孔隙,孔隙内水流主要受重力势的

控制,与毛管势和基质势关系不大^[27],据此 Radulovich 等将介于田间持水量与饱和持水量之间的孔隙界定为大孔隙^[28]。国内多数学者将土壤大孔隙定义与其功能相联系,即能够提供优先水流路径,介于田间持水量与饱和持水量之间的孔隙^[29]。不同地区、不同覆被下的土壤大孔隙成因、特征差异很大,进而产生了不同的土壤水文过程特征和生态水文效应^[30]。

试验观测是认识和研究大孔隙结构及其优先流的手段,目前主要通过室内试验和田间试验的方法分析土壤大孔隙及优先流特征。田间试验方法包括染色法和 CT 扫描法。其中,染色法是野外观测土壤大孔隙和优先流常用的一种方法,是将染料与水分混合,模拟降雨过程使染色剂渗入土壤,根据土体染色特征,描绘土壤剖面大孔隙网络形态,测量和计算孔隙大小、数量和体积^[31]。染色剂必须有良好的可视性和移动性,常用染料有亮蓝、亚甲基蓝等^[32]。染色后对大孔隙结构的分析可通过野外剖面描绘、拍照或制作切片后室内分析等途径。由于土壤表面不平整,肉眼分辨力有限,目视分析准确性较差^[33]。拍照分析是将土壤剖面分成几个断面,进行摄像,对孔隙数量、面积进行解译,精度较高,对土壤结构破坏小,是一种可行的分析方法^[34]。CT 扫描法是利用 X 射线层析扫描摄像,分析土壤大孔隙,比较简便快捷,但费用较高^[35]。室内试验方法是把大孔隙结构视作一个整体,根据溶质迁移和水流特征,通过土柱模拟试验,结合基本水流理论和 Poiseuille 公式,推算土壤大孔隙的形态结构^[36]。通过田间试验可直观描述和测量大孔隙的个体形态和实际大小,但不能反映大孔隙间的连通性,与优先流发生过程联系不紧密。而室内试验则把土体内大孔隙作为一个整体,根据优先流特征推算土壤大孔隙的形态特征,由于土壤孔隙内水流速度取决于孔径最小的孔隙,计算结果小于直接测定的结果。当前研究多通过单一方法对土壤大孔隙和优先流进行分析,缺少田间试验与室内实验的对比研究,未能从物理过程上分析大孔隙影响入渗和产流的机制^[37]。综上所述,目前对大孔隙的定义尚存在分歧,由于研究目的不同以致观测手段也各不相同^[38-41]。水和溶质的运移过程模拟更是建立在多个理论假设基础上的探索,导致研究结果与实际情况差异较大。

3 砾石覆盖对土壤水文过程的影响

地表砾石覆盖对入渗规律的影响研究主要从野外小区试验和室内模拟试验两方面展开的。且这两方面的研究结果都表明,土壤表面砾石覆盖对入渗的影响比较复杂。李小雁野外小区试验结果表明,砂砾

覆盖能够改变土壤的水文过程,提高土壤导水率,从而减少蒸发和产流,提高入渗。他通过测定小区不同土壤深度的水势和基质势发现:在较浅土壤层,砾石覆盖小区的水势和基质势比对照小,但在较深土壤层,砾石覆盖小区的水势和基质势比对照小区的大,表明砾石覆盖的小区有较高的入渗。他认为砂砾覆盖能够截留雨水,消弱雨滴溅蚀力,阻止侧渗,另外,砾石覆盖能够防止土壤表面密封和结皮,增加地表粗糙度,从而增加入渗^[42]。Cerdeira 室内模拟试验研究了瑞典东南部地区砂砾覆盖对入渗特性的影响,结果表明土壤稳渗率与砾石覆盖度之间为正相关关系^[43]。他认为土体和砾石之间的孔隙有利于入渗水快速向深层土壤渗透。同时砂砾能拦蓄大量雨水,故而土壤中砂砾含量越高,越有利于植被根系的生长和孔隙的发育,从而使得土壤入渗率越高。

砾石覆盖能够有效地抑制蒸发。由于砾石覆盖能在土体表面形成一个干土层,干土层能阻止毛管水的上升从而减少实际蒸发。对此,一些学者进行了深入研究,发现砾石粒径和厚度对水文过程等产生影响^[43]。如刘谦和等研究了不同砾石组成和覆盖厚度砂田的水分蒸发、土温变化特性,确定了最佳的砾石组成和覆盖厚度^[44];陈士辉等在甘肃省皋兰县的研究结果表明,砾石粒径愈大,砂田土壤蒸发愈多^[45]。Wesemael 等通过室内模拟试验发现,当土壤初始湿润时,在蒸发初始阶段砾石覆盖能显著降低土壤蒸发深度,但是当土壤初始干燥时,在得到较少降雨时,砾石覆盖会使得蒸发显著高于无砾石覆盖。因此,砾石覆盖对蒸发的影响表现为在湿润时降低蒸发和干燥时增加蒸发^[46]。

前人主要采用实验室土柱模拟试验研究砾石覆盖对蒸发的影响,研究结果表明,砂砾覆盖能够抑制蒸发,抑制效果与砂砾粒径大小、颜色和厚度等有关。Diaz 等采用土柱模拟试验研究了不同厚度砾石覆盖对土壤蒸发的影响,研究结果表明:10 cm 厚的砾石覆盖的抑制蒸发效果要优于 5 cm 的^[47]。谢忠奎等模拟研究了不同厚度和不同粒径砾石覆盖对蒸发的抑制效果^[48]。在研究过程中,大部分学者作累计蒸发量或累计蒸发率与时间关系图,通过一定时段内累计量的比较表明砂石覆盖抑制蒸发的作用效果。另有一部分学者作单位时段内蒸发量与时间关系图,通过相同时段内蒸发量的比较表明作用效果。由此可见,大部分学者都是通过称重法获得累积蒸发量随时间的关系,从而来研究砂石覆盖对土壤蒸发的影响,较少关注砂石覆盖对蒸发过程和土壤水分的再分布规律的影响,因此有必要加强此方面的研究。

4 砂田土壤大孔隙特征及土壤水文过程研究意义

砂田我国西北干旱区应用广泛,并取得了显著的经济、生态和社会效益。李小雁^[43]和陈士辉等^[45]的研究表明,砂田土壤由于砾石覆盖土壤水分入渗速率显著增加,土壤蒸发受到抑制。吴继强等用物理模拟试验研究了大孔隙对土壤水分入渗特性影响,研究表明,土壤饱和入渗性能在很大程度上依赖于能导水的大孔隙的大小和数量^[49]。时忠杰等^[15]和关红杰等^[50]研究了土壤中砾石对渗透性和蒸发的影响。此外,砂田退化程度影响着土壤水文过程,如增加入渗和抑制蒸发性能的降低势必造成水分利用效率的降低。这些研究为土壤大孔隙优先流发生过程的监测提供了可借鉴的试验方法,为揭示砾石覆盖促进降雨入渗的机理,以及评价农田调控径流、保持水土、抑制蒸发的水文生态功能提供了研究思路、方法和手段。综上所述,砾石覆盖土壤能增加大孔隙并促进降水入渗,加快壤中流的发生,减少径流和抑制蒸发,改变了土壤水文循环过程,土壤水文生态功能也随之改变。但国内对砾石覆盖土壤大孔隙特征和优先流的研究尚处于定性和半定量研究阶段,缺少砾石覆盖下土壤大孔隙及优先流的变化对土壤入渗和蒸发等水文过程影响的相关分析,有必要在典型区域开展研究。

5 结语

砾石覆盖对土壤大孔隙的形成具有重要作用。土壤表层覆盖砾石通过影响土壤容重、层次结构、孔隙度、土壤含水量和地表结皮数量,进而影响土壤水文过程。土壤大孔隙是可以提供优先水流路径的孔隙。砾石覆盖对土壤大孔隙的半径、数量、连通性和密度都有重要影响。大孔隙的研究方法可分为直接观测法和间接描述法,其各有适用性和局限性。揭示这些实验方法的优点与存在的问题,并指出由于影响大孔隙及大孔隙流的因素较复杂,应将大量的野外试验和室内实验相结合,才能使大孔隙流理论不断地完善,进而解决非饱和土壤中与大孔隙流有关的水流和溶质运移问题。此外,砂田退化程度影响着土壤水文过程,如增加入渗和抑制蒸发性能的降低势必造成水分利用效率的降低。土壤大孔隙研究的最终目的是调控,研究土壤大孔隙优先流发生过程可为揭示砾石覆盖促进降雨入渗的机理,为减少地下水污染、控制养分和水分的流失提供一条新途径,以及评价农田调控径流、保持水土、抑制蒸发的水文生态功能提供了研究思路、方法和手段。

参考文献:

- [1] 原翠萍,张心平,雷廷武,等. 砾石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2007,24(7):25-28.
- [2] 王金牛,谢忠奎,郭志鸿,等. 砂田退化对土壤温度和蒸发影响的模拟研究[J]. 中国沙漠,2010,30(2):388-392.
- [3] Benoit G R, Kirkham D. The effect of soil surface stones condition on evaporation of soil water[J]. Soil Sci. Soc. Am.,1963,27(5):495-498.
- [4] Adams J E. Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion[J]. Proc Soil Sci Soc Am., 1966,30:110-114.
- [5] 杜延珍. 砂田在干旱地区的水土保持作用[J]. 中国水土保持,1993(4):36-39.
- [6] 陈士辉,谢忠奎,王亚军,等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J]. 中国沙漠,2005,25(3):433-436.
- [7] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: significance and processes[J]. Catena,1994,23(1/2):1-8.
- [8] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration[J]. Catena,1994,23(1/2):99-110.
- [9] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 六盘山典型植被类型土壤中砾石对大孔隙形成的影响[J]. 山地学报,2007(5):541-547.
- [10] 区自清,贾良清,金海燕,等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响[J]. 土壤学报,1999,36(3):341-347.
- [11] Poesen J, Ingelmo, Sanchez F, et al. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. Earth Surface Processes Landforms,1990,15(7):653-671.
- [12] Poesen J, Ingelmo, Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena,1992,19(5):447-451.
- [13] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. European Journal of Soil Science,2001,52(1):59-68.
- [14] Eriksson C P, Holmgren P. Estimating stone and boulder content in forest soils-evaluating the potential of surface penetration methods[J]. Catena,1996,28(1/2):121-134.
- [15] 时忠杰,王彦辉,于澎,等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. 生态学报,2008,28(12):6091-6098.
- [16] 杨忠,熊东红,周红艺,等. 干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗与林木生长[J]. 中国科学(E辑),2003,33(增):85-93.
- [17] Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa[J]. Catena,1994,23

- (1/2):87-97.
- [18] Ingelmo F, Cuadrado S, Ibaez A, et al. Hydric properties of some Spanish soils in relation to their rock fragment content: implications for runoff and vegetation[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2):73-85.
 - [19] Poesen J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(1):1-10.
 - [20] 秦耀东, 任理, 王济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2):203-207.
 - [21] Germann P F, Beven K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores[J]. *Water Resource Research*, 1985, 21(7):990-996.
 - [22] German P, Edwards W M, Owens L M. Profiles of bromide and increased soil moisture infiltration into soils with macropore[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(2):237-244.
 - [23] 张洪江, 程金花, 何凡, 等. 长江三峡花岗岩地区优先流运动及其模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
 - [24] Kutilek M, Germann P F. Converging hydrostatic and hydromechanic concepts of preferential flow definitions[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/4):61-66.
 - [25] Luxmoore R J, Jardine P M, Wilson G V, et al. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope[J]. *Geoderma*, 1990, 46(1/3):139-154.
 - [26] Skopp J. Comment on micro-, meso-, and macroposity of soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45:12-46.
 - [27] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resource Research*, 1982, 18(5):1311-1325.
 - [28] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53:556-559.
 - [29] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及对水分出流速率的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(3):507-512.
 - [30] 李燕, 高明, 魏朝富, 等. 土壤砾石的分布及其对水文过程的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(5):271-276.
 - [31] 盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(1):101-108.
 - [32] 郑继勇, 王丽梅, 邵明安. 应用亮蓝染色剂指示溶质迁移边界层的研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(1):100-104.
 - [33] 张洪江, 王玉杰, 北原曜, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流实验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5):53-57.
 - [34] 邱琳, 吴华山, 陈效民, 等. 利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究[J]. *土壤*, 2007, 39(4):621-626.
 - [35] 冯杰, 郝振纯. CT 在土壤中大孔隙研究中的应用评价[J]. *灌溉排水*, 2000, 19(3):71-76.
 - [36] 石辉, 王峰, 李秧秧. 黄土丘陵区人工油松林地土壤大孔隙定量研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1):28-32.
 - [37] Suzanne E A, Stéphanie R, Allan J C. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1/2):179-204.
 - [38] Coppola A, Kutilek M, Frind E O. Transport in preferential flow domains of the soil porous system: Measurement, interpretation, modelling, and upscaling[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/4):1-3.
 - [39] 邵明安, 马东豪, 朱元骏, 等. 黄土高原土石混合介质土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
 - [40] Cousin I, Nicoulaud B. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. *Catena*, 2003, 53:97-114.
 - [41] Yamanaka T, Inoue M, Kaihotsu I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2):145-155.
 - [42] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52:105-127.
 - [43] Li X Y, Gong J D, Wei X H. In-situ rainwater harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China[J]. *Journal of Arid Environment*, 2000, 46(4):371-382.
 - [44] 刘谦和, 李志强. 砂田土壤的水蒸发特征和温度变化[J]. *甘肃农业科技*, 1993, (8):27-28.
 - [45] 陈士辉, 谢忠奎, 王亚军, 等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25:433-436.
 - [46] van Wesemael B, Poesen J, Kosmas C S, et al. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments[J]. *Journal of hydrology*, 1996, 182(1):65-82.
 - [47] Diaz F, Jimenez C C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation[J]. *Agriculture Water Management*, 2005, 74:47-55.
 - [48] Xie Z K, Wang Y J, Jiang W L, et al. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China[J]. *Agriculture Water Management*, 2005, 81:173-184.
 - [49] 吴继强, 张建丰, 高瑞. 大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟实验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10):13-17.
 - [50] 关红杰. 砂砾覆盖对土壤入渗和蒸发的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.