

# 滴灌条件下容重对压砂土壤水分入渗规律的影响

赵文举, 郁文, 范严伟, 唐学芬, 马宏

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** [目的] 研究土壤容重对压砂地点源入渗的影响规律, 为西北旱区发展砂地滴灌技术提供实际理论依据。[方法] 通过室内模拟土槽试验, 以裸地(无植被和压砂)为对照组(CK), 研究了土壤容重(1.23, 1.38, 1.53 g/cm<sup>3</sup>)对不同种植年限压砂地(新压砂地、中压砂地、老压砂地)砂石层和土壤层两相介质点源入渗规律的影响。[结果] 压砂土壤点源垂直累积入渗与其容重和种植年限皆呈负相关关系, 压砂土壤在入渗初期, 容重对其入渗深度无明显影响, 当入渗到达土壤后, 入渗深度明显受到容重的影响, 容重越大, 入渗深度越小; CK 水平入渗距离随容重增加而增加, 压砂土壤水平入渗随容重增加的变化无明显规律。用  $\lambda$  表征湿润体纵横比, CK 和压砂土壤的  $\lambda$  总体随土壤容重增加而减小, 压砂土壤容重相同时,  $\lambda$  随种植年限增加而减小。CK 入渗前期  $\lambda$  随入渗时间的增加而增加, 后期趋于平缓; 压砂土壤  $\lambda$  入渗初期随时间增加显著增大, 当入渗到达土壤时  $\lambda$  减小, 中后期随入渗时间增加  $\lambda$  缓慢增长直至变化不明显。[结论] 压砂对土壤水分垂直入渗有促进作用, 压砂土壤点源垂直累积入渗与其容重和种植年限皆呈负相关关系。

**关键词:** 点源入渗; 容重; 种植年限; 双重介质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0169-05

中图分类号: S157.2

文献参数: 赵文举, 郁文, 范严伟, 等. 滴灌条件下容重对压砂土壤水分入渗规律的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 169-173. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.029

## Influences of Soil Bulk Density on Point Source Infiltration Pattern Under Drip Irrigation Condition in Gravel-sand Mulch Soil

ZHAO Wenju, YU Wen, FAN Yanwei, TANG Xuefen, MA Hong

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** [Objective] The influences of soil bulk density on point source infiltration in gravel-sand mulched field were studied in order to provide basis for the development of drip irrigation technique in sandy area. [Methods] Bare land(no vegetation and sand mulch) was selected as the contrast group(CK). Based on laboratory simulation experiment, this article studied the influences of different soil bulk density(1.23 g/cm<sup>3</sup>, 1.38 g/cm<sup>3</sup>, 1.53 g/cm<sup>3</sup>) on point source infiltration pattern in gravel-sand with different planting years(new gravel-sand mulched field, middle gravel-sand mulched field, old gravel-sand mulched field). [Results] The point source vertical cumulative infiltration showed a negative correlation with soil bulk density and planting years. Soil bulk density showed no significant effect on the infiltration depth in the initial period of infiltration. While infiltration depth were significantly influenced by the density as the infiltration reached the soil, and bulk density decreased with the increase of infiltration depths. Horizontal infiltration distance of CK increased with the increase of soil bulk density, while the change of horizon infiltration of gravel-sand mulched field was not obvious. The moist body aspect ratio was represented with  $\lambda$ , the  $\lambda$  of CK and sand mulch soil decreased with the increase of soil bulk density. When sand mulch soil bulk density was constant,  $\lambda$  decreased with the increase of planting years. The  $\lambda$  of CK increased with the increase of infiltration time in the initial days of infiltration and then became stable. The  $\lambda$  of sand mulch soil increased significantly with the increase of infiltration time in the initial minutes of infiltration, while it decreased when infiltration reached the soil, and the increase of  $\lambda$  was not obvious in the late minutes. [Conclusion] Gravel-sand mulch promote the vertical cumulative infiltration of soil moisture, and point source vertical cumulative infiltration show a negative correlation with soil bulk density and planting years.

**Keywords:** point source infiltration; soil bulk density; planting years; double medium

收稿日期: 2015-03-27

修回日期: 2015-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“压砂地土壤水分时空变异理论与模型研究”(51269008), “基于微润灌的固沙植物生长动态及灌溉模式研究”(51409137); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划资助项目(Q201310)

第一作者: 赵文举(1981—), 男(汉族), 甘肃省永昌县人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: wenjuzhao@126.com.

灌溉是为了保证土壤具有一定的含水率以满足作物正常生长的需要。对灌溉进行调控,可以保证灌水能较好地有一定土层范围内分布,最大限度地作为作物所利用<sup>[1]</sup>。土壤表层压砂作为一种古老的覆盖制度,在中国已有 300 a 多的历史<sup>[2]</sup>。土壤表层压砂可以高效利用降水、抑制土壤蒸发、防止土壤次生盐渍化、改善土壤理化性质,显著提高土壤储水量,最终提高作物产量<sup>[3-4]</sup>。由于降雨具有偶然性,使得作物长期需要的水分无法适时满足,导致产量较低,因此对压砂地采取合理的补灌措施很有必要。XIE Zhongkui 等<sup>[5]</sup>从压砂地补灌的缘由,限制其补灌的因素,传统灌溉方式带来的不良后果等方面进行了研究分析,提出以滴灌代替以往的粗放式漫灌,可以很好地提高压砂地作物产量,达到稳产增产目的,且不会加重砂田的退化。田媛等<sup>[6]</sup>发现对压砂地采用集雨滴灌,能极大缓解水分对植物的胁迫,大幅提高单产。在降雨、入渗、水分再分布、蒸发的水循环过程中,土壤经历了由干到湿、再由湿到干的交替过程,土壤容积不断发生变化,特别是黏粒含量高的土壤<sup>[7]</sup>。这就使得土壤的水分运动和水分运动参数不仅受土壤含水量或水势的影响,也受到容重的影响,尤其在土壤饱和状态时更为明显<sup>[8-9]</sup>。张振华等<sup>[10]</sup>通过试验发现,滴灌条件下,随着土壤容重增加,水平入渗距离增加,垂直入渗距离减小。而关于滴灌情况下,土壤容重对压砂土壤垂直入渗和水平入渗的影响研究还较少。随着种植年限增加,由于施肥和灌溉方式等不当的人为措施或者降雨和种植年限增加等自然原

因,使得压砂层土砂比明显上升,砂石层演变为砂石土混合介质,影响其入渗能力,导致砂石表层滴灌情况下,水平和垂直入渗规律变得更加复杂。故本文拟通过在滴头流速确定条件下,分析土壤容重对不同种植年限压砂地湿润锋推进距离的影响,研究压砂地水平入渗和垂直入渗规律,以期对西北旱区发展砂地滴灌技术提供实际理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于甘肃省景泰县兰州理工大学试验基地附近(104°05′54″—104°12′54″E, 36°24′54″—36°33′54″N),地处中国西部河西走廊东端,甘、蒙、宁 3 省(区)交界处,黄土高原与腾格里沙漠的过渡地带。土壤类型主要为洪积灰棕荒漠土和灰钙土。景泰县地处季风区与非季风区过渡地带,降水稀少且集中,年内分配和地区分布不均,年际变化大的特点,年均降水量 185 mm,多集中在 7—9 这 3 个月,占全年降水量的 61.4%,年均蒸发量 3 038 mm,是降水量的 16 倍。

供试土壤采自该试验基地附近的 3 块不同种植年限压砂地和裸地耕作层土壤(0—30 cm),砂石为对应压砂地表层压砂(颗粒级配见表 1)。以裸地(无植被和砂石覆盖)为参照组(CK),压砂地的划分以种植年限为基准:新压砂地(NGM)种植年限不足 10 a、中压砂地(MGM)种植年限为 25~30 a、老压砂地(OGM)种植年限为 45~60 a<sup>[11]</sup>。

表 1 砂石级配

砂地类型	颗粒组成/%					
	>20 mm	20~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.075 mm	<0.075 mm
新砂地	11.6	29.4	26.2	22.5	9.5	0.8
中砂地	6.7	30.6	20.9	20.6	16.7	4.5
老砂地	9.1	24.6	15.9	19.6	22.5	8.3

### 1.2 试验方法

供试土壤经风干碾压并去除杂物后,过 2 mm 土筛,土壤初始含水率为 0.8%,按预定土壤容重分层(5 cm)装入试验土槽,土槽规格为 1.0 m×0.6 m×0.5 m,层间创毛,装土厚度 30 cm,压砂厚度为 10 cm。因为压砂层中已混合部分土壤,所以试验将砂石层和土壤层看作两层介质不同的土壤来统一研究。土壤表面无径流产生,测定 CK 和 3 种压砂土壤在相同滴头流量、不同容重(1.23, 1.38, 1.54 g/cm<sup>3</sup>)下的

湿润锋水平距离和垂直深度,所有试验重复 3 次。采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 进行数据分析与绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 容重对压砂土壤累积入渗的影响

滴灌条件下的水分运动实际上是点源入渗<sup>[12]</sup>,容重是影响土壤水分入渗特性的重要参数,对单一土壤点源入渗而言,一般容重越大,入渗速率越小。压砂地种植年限不同时,容重对压砂土壤点源累积入渗的影响如图 1 所示。

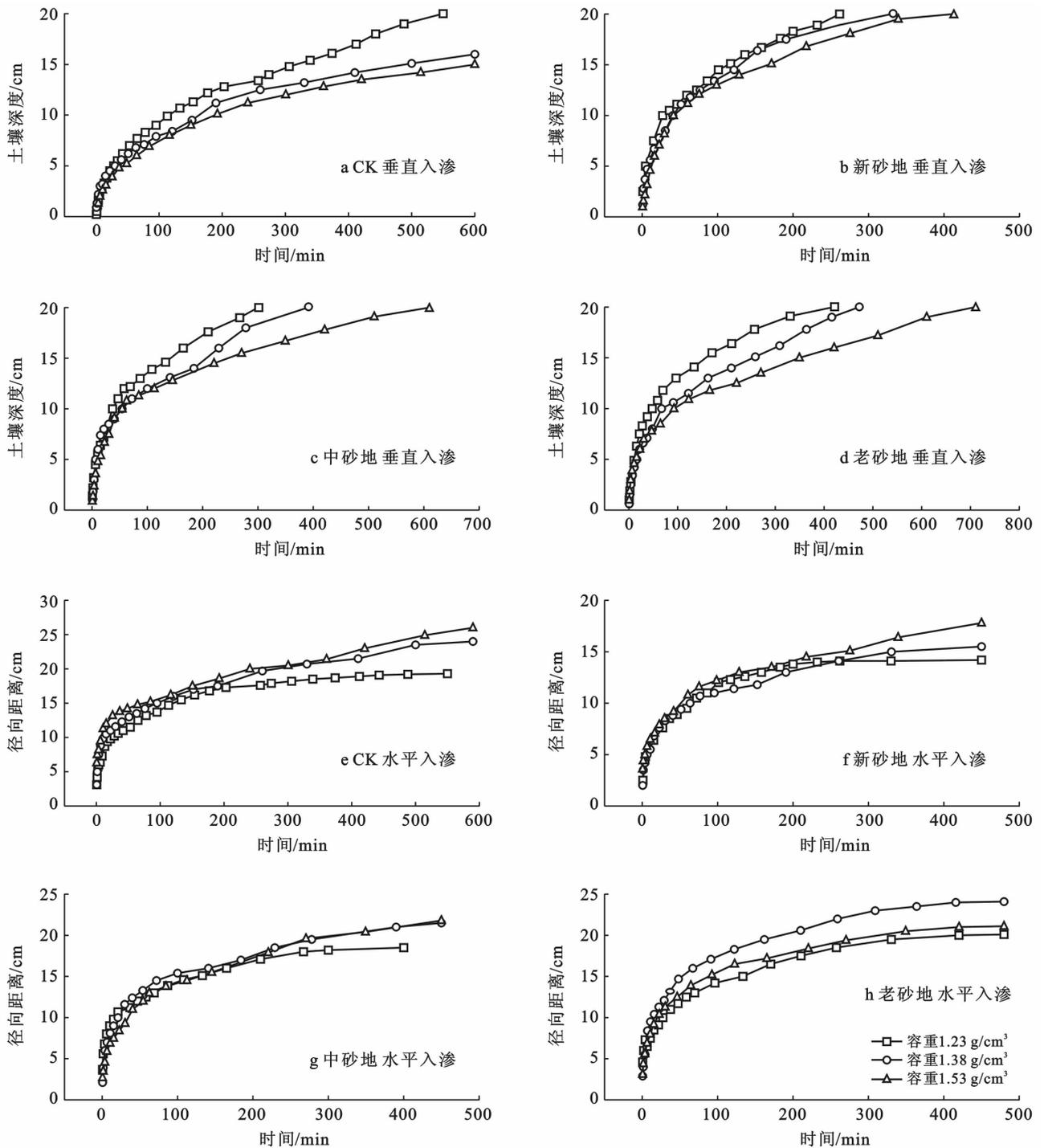


图 1 土壤容重对压砂地垂直和水平累积入渗的影响

从图 1(a—d) 可看出, CK 入渗深度随着容重增加而减小, 且其入渗深度之间的差异有随时间增加而增大的趋势; 压砂土壤在入渗时间为 0~60 min 时, 容重对其入渗深度影响不明显, 因为这个时间段, 入渗只发生在砂石层, 当入渗到达土壤后, 入渗深度明显受到容重的影响, 容重越大, 入渗深度越小, 原因是随着土壤容重增加, 大孔隙数量减少, 导水率减小, 最终导致入渗深度减小。

从图 1(e—h) 可看出, CK 水平累积入渗距离呈

现随容重增加而增加的规律, 土壤容重对压砂土壤水平累积入渗规律影响不明显, 原因是文中水平入渗发生在砂石层表面, 同一砂地类型所用砂石覆盖层不变, 但其介质复杂, 覆盖时不能达到完全一致; 土壤容重增加, 阻碍了水分垂直入渗, 反之增加了水分在砂石层的水平入渗。

当滴头流速确定时, 压砂土壤垂直点源入渗受到土壤容重(图 1)和种植年限(图 2)的共同影响。由图 1(a—d) 可知, 当压砂地种植年限相同时, CK 和压砂

土壤点源垂直累积入渗与其容重呈负相关关系;由图 2 可知,容重一定时,压砂土壤点源垂直累积入渗与其种植年限呈负相关关系且均高于 CK,原因是随着种植年限的增加,新、中、老压砂地压砂层中含土率分

别增加为 32.8%,41.8%,50.4%(粒径<2 mm,见表 1),土壤颗粒和砂石有机的结合在一起,对垂直入渗起到了阻碍作用。与 CK 相比,压砂可以显著提高土壤垂直入渗。

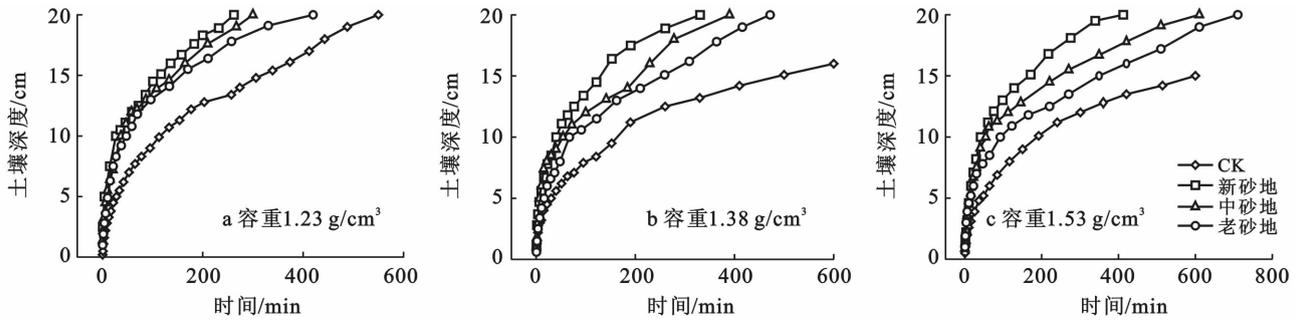


图 2 种植年限和土壤容重对压砂土壤点源入渗深度的影响

图 3 为入渗时间 200 min 时,压砂土壤垂直和水平累积入渗距离。由图 3 可看出,当入渗时间为 200 min 时,CK 和压砂土壤累积入渗深度随容重增加而减小,CK 水平入渗距离随容重增加而增加,压砂土壤水平入渗随容重增加无明显规律。土壤容重由

1.23 g/cm³ 增加到 1.38 g/cm³ 时,CK 与新、中、老压砂地垂直入渗深度分别减小了 10.16%,2.73%,12.79%,14.81%;土壤容重由 1.23 g/cm³ 增加到 1.53 g/cm³ 时,CK、新、中、老压砂地垂直入渗深度分别减小了 20.31%,12.57%,18.60%,24.69%。

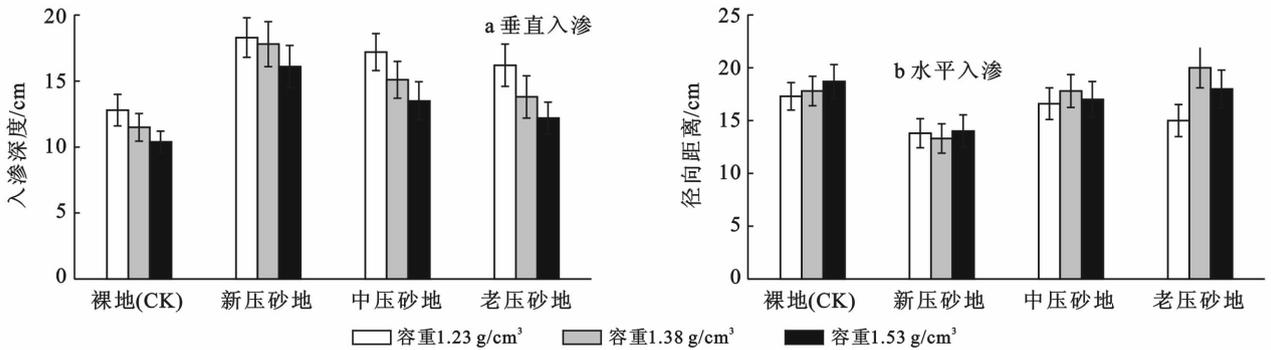


图 3 入渗时间为 200 min 不同容重土壤点源累积入渗深度

## 2.2 砂石覆盖对土壤湿润体性状的影响

砂地滴灌过程中始终伴随着垂直入渗和水平入渗,且两者相互作用形成了椭球状湿润体。用  $\lambda$  表示不同时间段湿润体的形状, $\lambda = R_y/R_x$ , $R_y$  表示垂直入渗深度, $R_x$  表示水平入渗距离。 $\lambda > 1$ ,说明垂直入渗距离大于水平入渗距离; $\lambda < 1$ ,说明垂直入渗距离小于水平入渗距离; $\lambda = 1$ ,两者入渗距离相等。不同容重压砂土壤  $\lambda$  随时间的变化规律如图 4 所示。

从图 4 可看出,CK 和覆砂土壤的  $\lambda$  总体随容重增加而减小,原因是随着土壤容重增加,土壤导水率和饱和含水率均减小,垂直入渗速率减小,与李卓等<sup>[13]</sup>研究结果一致,又因为滴水速率恒定且试验期间未出现积水,促进了水平入渗。入渗前期,CK 的  $\lambda$  随入渗时间的增加而增加,入渗后期, $\lambda$  趋于平缓。压砂土壤水分入渗初期  $\lambda$  随时间增加显著增大,原因

是入渗过程发生在砂石层,砂石层之间大空隙多,垂直入渗速率大;当入渗到达土壤时,因为垂直入渗速率相比砂石层突然减缓,故  $\lambda$  减小,然后随着入渗时间继续增加, $\lambda$  出现缓慢增长直至变化不明显。

土壤容重为 1.23 g/cm³,CK 与中压砂地、老压砂地入渗时间分别为 550,160,420 min 时  $\lambda > 1$ ,即垂直入渗距离大于水平入渗距离,土壤容重增大到 1.38,1.53 g/cm³, $\lambda$  先增大后趋于稳定且始终  $\lambda < 1$ ,即垂直入渗距离小于水平入渗距离;新压砂地入渗 30 min 时,各组容重情况下, $\lambda > 1$ ,原因是水平方向入渗只受基质势的作用,而垂直入渗受基质势和重力势的共同作用,随着入渗时间的延长,在垂直方向上的重力势作用会越来越明显,从而湿润体的纵横比例会越来越大,这与王永东等<sup>[14]</sup>研究均一介质土壤的结果一致。

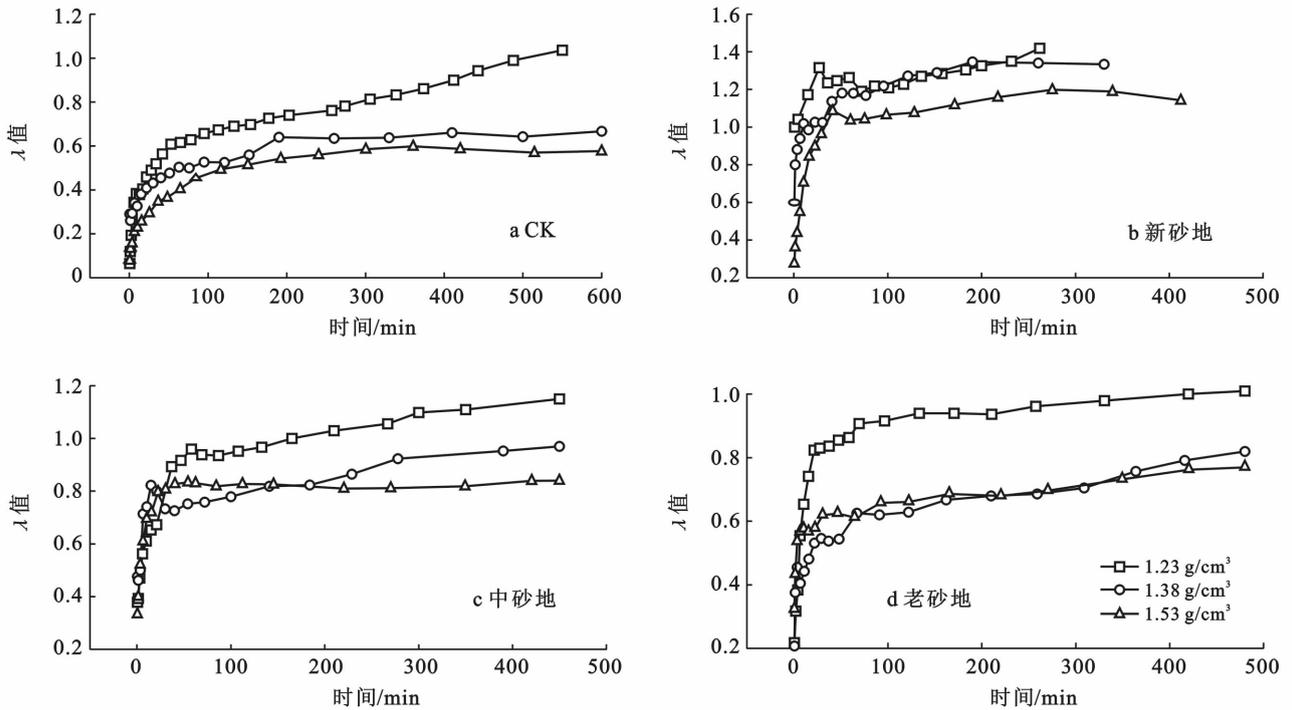


图 4 不同容重压砂土壤湿润体形状参数  $\lambda$  值随时间的变化

### 3 结论

(1) 压砂土壤点源垂直累积入渗与其容重和种植年限皆呈负相关关系,压砂土壤在入渗初期,因为入渗只发生在砂石层,容重对其入渗深度无明显影响,当入渗到达土壤后,入渗深度明显受到容重的影响,容重越大,入渗深度越小,原因是随着土壤容重增加,大孔隙数量减少,导水率减小,最终导致入渗深度减小。入渗时间为 200 min 时,CK 和压砂土壤累积入渗深度随容重增加而减小,CK 水平入渗距离随容重增加而增加,压砂土壤水平入渗随容重增加无明显规律。

(2) CK 和压砂土壤的  $\lambda$  总体随容重增加而减小,入渗前期,CK 的  $\lambda$  随入渗时间的增加而增加,后期趋于平缓,压砂土壤  $\lambda$  随时间增加显著增大,原因是入渗过程发生在砂石层;当入渗到达土壤时,因为垂直入渗速率相比砂石层突然减缓,故  $\lambda$  减小,入渗后期随着入渗时间继续增加, $\lambda$  出现缓慢增长直至变化不明显。土壤容重为  $1.23 \text{ g/cm}^3$ ,CK 与中压砂地、老压砂地入渗时间分别为 550,160,420 min 时  $\lambda > 1$ ,即垂直入渗距离大于水平入渗距离;土壤容重增大到  $1.38, 1.53 \text{ g/cm}^3$ ,CK 和中、老压砂地  $\lambda$  先增大后趋于稳定且始终  $\lambda < 1$ ,即垂直入渗距离小于水平入渗距离,新压砂地入渗 30 min 后,各组容量重下  $\lambda > 1$ ,说明压砂可以显著提高土壤垂直入渗。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 康绍忠,梁银丽,蔡焕杰. 旱区水—土—作物关系及其最优调控原理[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [2] 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.
- [3] Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Gao Qianzhao, et al. Rainfall interception loss by pebble mulch in the semiarid region of China[J]. Journal of Hydrology, 2000,228(3/4):165-173.
- [4] 王占军,蒋齐,何建龙,等. 宁夏环香山地区压砂地土壤微生物结构及功能多样性研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):290-294.
- [5] Xie Zhongkui, Wang Yajun, Wei Xinghu, et al. Impacts of a gravel-sand mulch and supplement drip irrigation on watermelon (*Citrullus lanatus* [Thunb.] Mats. & Nakai) root distribution and yield[J]. Soil and Tillage Research, 2006,89(1):35-44.
- [6] 田媛,李晓玲,李凤民,等. 砂田集雨补灌对西瓜产量和土壤水分的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(4):459-463.
- [7] 吕殿青,邵明安,王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报,2003,33(3):110-114.
- [8] Bronswijk J J B. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990,54(5):1500-1502.
- [9] 邵明安,吕殿青. 土壤收缩特征曲线试验研究[J]. 土壤学报,2003,40(3):471-474.
- [10] 张振华,蔡焕杰,郭永昌,等. 滴灌土壤湿润体影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):17-20.

上降雨量大,暴雨冲击多,导致土壤抗侵蚀能力下降,从而水土流失多发。

## 4 结论

(1) 基于 RUSLE 模型结合 RS 与 GIS 技术实现水土流失评估的关键在于如何选取各因子的计算模型及模型参数的本地化调教,本文所取得的研究成果可为研究区的水土流失防治提供科学的决策依据,对与研究区条件类似的其他区域的水土流失评估研究也具有重要的参考价值。

(2) 2013 年研究区水土流失相比往年已大有好转,但仍较为严重,其中河田镇、策武乡、濯田镇、三洲乡是重灾区,应重点治理。

(3) 不合理的人类活动是造成研究区水土流失的主要原因,尽量减少不合理的人类活动、有效提高植被覆盖率是今后治理研究区水土流失的重要参考措施。

(4) 本研究可为解决我国南方红壤分布区 RUSLE 模型本地化研究提供重要参考,可为长汀县水土流失防治及解决与此相关的其他问题提供科学决策依据。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland and east of the Rocky Mountains [M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1965.
- [2] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究,2004,11(4):80-83.
- [3] Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.
- [4] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报,1992,6(4):1-5.
- [5] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省天然降雨雨滴特征的研究[J]. 水土保持学报,1995,9(1):8-12.
- [6] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [7] 吕喜玺,沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. 水土保持学报,1992,6(1):63-70.
- [8] 方纲清,阮伏水,吴雄海,等. 福建省主要土壤可蚀性特征初探[J]. 福建水土保持,1997(2):19-23.
- [9] 曹龙熹,符素华. 基于 DEM 的坡长计算方法比较分析[J]. 水土保持通报,2007,27(5):58-62.
- [10] Hickey R A, Smith P J. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1994,18(5):365-380.
- [11] 陈明华,周伏建,黄炎和,等. 坡度和坡长对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,1995,9(1):31-36.
- [12] 马超飞,马建文,布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报,2001,21(4):6-9.
- [13] 江洪. 长汀县水土流失遥感监测及其生态安全评价[D]. 福州:福州大学,2005.
- [14] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,50(1):1-17.
- [15] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J]. 生态学报,2013,33(10):2974-2982.
- [16] 黄金良,洪华生,张路平,等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):75-79.
- [17] 戴清霞. 基于 GIS 和遥感的长汀县水土流失动态监测[D]. 福州:福建师范大学,2006.
- [18] 林惠花. 典型区域土壤侵蚀的地理学分析:以福建长汀为例[D]. 福州:福建农林大学,2009.
- [19] 王维明,陈明华,林敬兰,等. 长汀县水土流失动态变化及防治对策研究[J]. 水土保持通报,2005,25(4):73-77.
- [11] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess of northwest China[J]. Catena, 2003,52(2):105-127.
- [12] 吕殿青,王文焰,王全九. 滴灌条件下的土壤水盐运移特性的研究[J]. 灌溉排水,2000,19(1):15-21.
- [13] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [14] 王永东,张宏武,徐新文,等. 风沙土水分入渗与再分布过程中湿润锋运移试验研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(8):190-194.

(上接第 173 页)