文章编号:1007-2284(2021)05-0001-05

垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响及其布局优化研究进展

邢子强[1],刘姗姗[2],吕振豫[2]

(1. 水利部水利水电规划设计总院,北京 100120;
2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘　要:垄沟耕作是实现干旱区雨养农田降水资源高效利用的重要措施之一,已在全球范围内得到广泛应用。国内外学者主要从大气过程、地表过程、土壤过程和地下水过程4个方面开展了垄沟耕作模式对雨养农田水循环过程影响的一系列试验和模拟研究,并得出雨养农田垄沟耕作模式具有集水保墒作用的研究结论。垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响的研究方法包括室内模拟实验、大田观测试验和数值模型模拟3种。此外,国内外相关学者还采用数理统计最优化分析方法、数学建模等方法提出了面向降水资源高效利用的雨养农田垄沟布局优化的研究成果。

关键词:垄沟耕作;雨养农田;水循环过程;布局优化

中图分类号:TV93　　**文献标识码:**A

邢子强,刘姗姗,吕振豫. 垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响及其布局优化研究进展[J]. 中国农村水利水电,2021(5):1-5.

XING Z Q, LIU S S, LÜ Z Y. Review on the effects of ridge-furrow tillage on water cycle over the rain-fed cropland and its optimized pattern[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5):1-5.

Review on the Effects of Ridge-Furrow Tillage on Water Cycle over the Rain-Fed Cropland and its Optimized Pattern

XING Zi-qiang[1], LIU Shan-shan[2], LÜ Zhen-yu[2]

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 110120, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Ridge-furrow tillage is one of the main measures to increase rainfall use efficiency in the rain-fed cropland, which has been widely applied all over the world. Currently, the effects of ridge-furrow tillage on water cycle over the rain-fed cropland has been carried out by many scholars both at home and abroad, mainly focused on four aspects, i.e., the atmospheric process, land surface processes, soil process and ground water process, and have achieved some results showed that the ridge-furrow tillage could enhance the functions of rain-water harvesting and preservation soil moisture. In addition, the analytical methods of the effects of ridge-furrow tillage on water cycle has been concluded to three kinds: the laboratory simulation tests, the field experiments, and the numerical simulation method. Furthermore, the optimized ridge and furrow pattern to realize the highly efficient use of rainfall has been studied by the optimization analysis method or the mathematical modelling.

Key words: ridge-furrow tillage; rain-fed agriculture; water cycle process; optimized ridge-furrow pattern

---

收稿日期:2020-06-02

基金项目:国家自然科学基金青年项目"垄沟布局对滦河上游坡耕地暴雨截流-产流影响机理"(51709277)。

作者简介:邢子强(1984-),男,高级工程师,主要从事生态水文和农田水文模拟研究。E-mail: ziqiangxing@gmail.com。

通讯作者:刘姗姗(1987-),女,工程师,主要从事流域生态水文过程研究。E-mail: liushanshan198705@163.com。

0 引　言

根据国际粮农组织(FAO)统计数据[1],全球雨养农田分布面积约为12.26亿 hm^2(183.9亿亩),约占全球耕地总面积的80.3%,对于保障全球粮食安全发挥了极其重要的作用。作为农业大国,水资源问题一直是影响我国粮食安全生产的刚性约束之一[2]。垄沟耕作是一种雨养农业区蓄水保墒重要的耕作模式,通过人工起垄改变农田单元微地貌特征,对田块尺度土壤墒情进行调控。垄沟耕作制度早在2200多年前就被我国劳动人民所采用[3]。《汉书·食货志》中记录"广尺深尺曰甽,……,而播种于甽中"的"代田法",是典型的垄沟耕作模式。当前,国内外学者已经开展了垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响的一系列研究工作,并取得了丰富的研究成果。

本文从农田水循环过程梳理垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响相关研究成果,并归纳分析了垄沟耕作对雨养农田水循环影响的研究方法;进一步阐述了雨养农田垄沟布局优化的研究成果,对于推动我国干旱半干旱区雨养农业水资源高效利用、坡耕地水土流失治理等具有一定的指导意义。

1 垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响研究

垄沟耕作通过改变雨养农田局部微地形,进而对农田水循环大气过程的农田蒸散发,地表过程的坡面产流、洼地储流、地表径流,土壤过程的降水入渗和蒸发及地下过程的深层渗漏等过程产生影响,如图1所示。

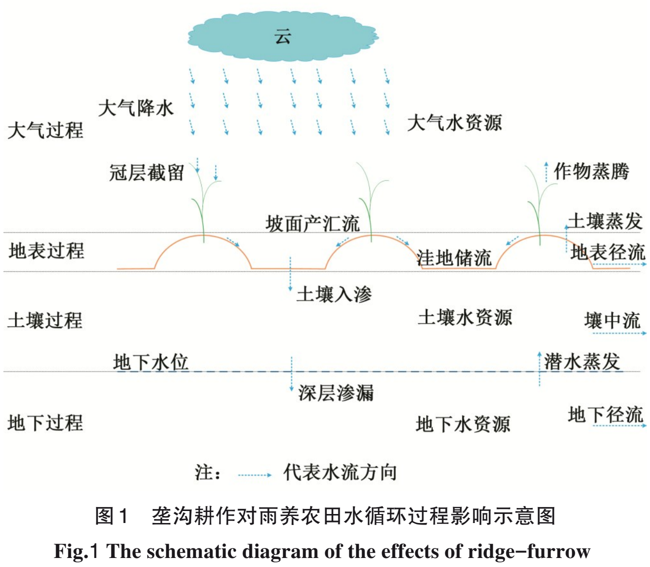

图1　垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响示意图

Fig.1 The schematic diagram of the effects of ridge-furrow tillage on water cycle over the rain-fed cropland

1.1 垄沟耕作对大气过程的影响

垄沟耕作对农田水循环大气过程影响主要体现在农田蒸散发过程,但由于受到研究区域、作物类型、耕作方式等因素影响,不同研究经常得到不同甚至相反的结论。Qin等[4]和田媛等[5]在我国西北地区不同垄沟耕作模式种植马铃薯对土壤蒸发影响的研究结果表明,垄沟耕作模式在马铃薯不同生长期对土壤蒸发的作用不同,幼苗期垄沟种植模式对土壤蒸发具有显著抑制作用,而在生长期垄沟耕作模式下农田蒸散发显著大于无垄带状种植模式。吕晓东等[6]基于甘肃张掖绿洲灌区不同耕作方式下春小麦棵间土壤蒸发的研究结果表明,相对于平地耕作模式,垄沟耕作模式对春小麦棵间土壤蒸发具有显著促进作用且垄沟棵间土壤蒸发量大于垄台。但Wade[7]采用水文模型对甘肃定西干旱气象与生态环境试验场的模拟分析结果表明,垄沟雨水收集系统能使作物生长季节(4-10月)平均土壤蒸发减少40%。Zhang等[8]对河北鱼儿山牧场垄沟耕作模式对老芒麦(*Elymus sibiricus L*)水分利用效率研究结果表明,采用垄沟耕作模式与平地耕作模式在老芒麦生长期内蒸散发不存在显著差异性。

1.2 垄沟耕作对地表过程的影响

垄沟耕作直接改变了农田的微地貌特征,影响田块尺度上降水分配,进而对农田水循环中坡面产汇流等地表过程产生直接影响。大部分研究结果表明垄沟耕作降低了降水坡面产流、提高降水累积入渗量,进而提升农田土壤含水量。如Taconet等[9]基于法国Grignon实验站垄沟种植的实验结果分析,垄沟耕作模式直接改变农田地表粗糙度,延缓了降水坡面产流时间,进而导致垄沟耕作模式下降水累积入渗量显著提高。Wang等[10]基于兰州大学旱区农业与生态修复试验站开展垄沟微集雨系统的径流效率实验结果表明,采用压实土垄沟耕作模式中田垄形成坡面产流的最小降水量为2.76~2.78 mm,平均场次降水的产流系数为24.6%~28.8%;而采用平地耕种模式中降水不产流。此外,垄沟耕作还将直接改变农田土壤理化性质,进而影响到农田降水产流过程。Twomlow等[11]对在不同耕种模式下津巴布韦3种典型土壤水分动态变化监测结果表明,农田垄沟耕作能够显著提高剖面土壤的储水性能;垄沟耕作模式在雨季比平地耕作模式能截留更多降水。严冬春等[12]在三峡库区紫色土坡耕地顺坡垄作对水土保持研究实验结果表明,垄沟耕作土壤总孔隙度比平地耕作模式高20.56%,垄坡土壤具有更大吸持水分潜力,降雨产流阈值更大。

1.3 垄沟耕作对土壤过程的影响

垄沟耕作对农田水循环土壤过程的影响主要体现为具有集水保墒作用。李永平等[13]于宁南山区农作物垄沟种植模式对降水入渗和土壤蓄水等研究的结果表明,垄沟种植模式能显著提高农田蓄水增墒作用,0~2 m土层土壤蓄水量在作物生长季和非生长季分别比平地耕作模式多78.0~136.7 mm和24.8~49.2 mm。Jiang等[14]于2010-2011年榆林市旱田农业示范园开展的覆膜垄沟种植绿豆的水土保持实验结果也证明,采用垄沟耕作种植绿豆模式下0~100 cm土层在整个生长期内土壤含水量比平地耕作模式增加了7.96~22.76 mm。刘目兴等[15]在内蒙古太仆寺旗沙区采用垄沟种植油菜模式下土壤水分动态观测实验结果也证明,在油菜生长季内采用垄沟种植模式土壤水分含量显著高于传统平地耕作模式,在0~30 cm耕作层尤为突出。但傅永斌等[16]基于冀西北旱坡地垄沟种植南瓜的大田实验结果表明,采用垄沟种植模式能够显著提高农田表层土壤含水量,而对深层土壤含水量的影响较为微弱。Ren等[17]在西北农

林大学作物试验站开展的模拟降雨条件下垄沟耕作对不同深度土壤含水量影响研究结果也表明，采用垄沟耕作模式下0~100 cm土层的土壤含水量显著大于对照组平地耕作模式下；而两组实验中100~200 cm土层的土壤含水量无显著差异性。

垄沟耕作模式对农田土壤含水量影响主要包括以下3方面的因素。一方面，垄沟耕作能够改变农田微地貌特征，提高土壤入渗并减少蒸散发，进而提高土壤含水量。如顾贺[18]基于兰州大学干旱农业生态试验站实施的垄沟耕作对土壤入渗和含水量影响研究结果表明，在集雨前期，田垄结皮较薄，垄沟耕作与平地耕作间土壤含水量不存在显著差异；在集雨中期，田垄结皮增厚，抑制土壤蒸发，垄沟耕作的土壤含水量显著大于平作模式；而在集雨后期，受作物耗水增大的影响，垄沟耕作与平地耕作之间土壤含水量差异不显著。McHugh等[19]对俄塞俄比亚北部高地农田垄沟耕作技术对农作物根区土壤含水量影响研究结果也表明，垄沟耕作模式保水性能与季节降水分布、耕地坡度等有关，垄沟耕作模式下作物根区土壤含水量比平地耕作模式大15%~24%。其次，垄沟耕作还将通过改善农田土壤理化性质提高降水入渗能力/累积入渗量，进而提高农田土壤含水量。Kuotsu等[20]在印度东北部山区开展的垄沟耕作模式对农田土壤理化性质影响研究表明，经过两季作物种植后，采用垄沟耕作模式的土壤入渗率和导水率均比平地耕种模式有显著提高，因此能够提高垄沟耕作模式下垂直剖面的土壤含水量。Robinson[21]采用自动土壤水分监测站对英国萨福克郡Upton Suffolk Farms农场垄沟种植马铃薯实验土壤入渗性能监测结果也证明，采用垄沟种植模式下降水绕过马铃薯种植的田垄而大部分经田沟入渗，从而提高降水累积入渗量。此外，垄沟耕作对农田土壤理化生性质的改变还将导致土壤持水性能的提升，进而提高土壤含水量。Hulugalle等[22]在布基纳法索Kamboinse实验站开展采用垄沟种植模式对土壤物理性质影响研究表明，田沟表层0~5 cm土壤层的黏粒含量显著大于田垄及平地耕作模式，同时影响到农田土壤表层土壤容重、日最高土温等土壤物理参数，导致垄沟耕作模式中田沟表层土壤的保水性能最优。于同艳等[23]基于中国科学院海伦农业生态试验站耕作措施对土壤墒情影响研究也表明，少耕垄作能显著改善土壤耕作层土壤持水能力，显著提高雨季期间农田土壤储流量，导致垄沟耕作模式下农田耕作层土壤含水量较高。林静等[24]对我国东北三省垄作免耕覆盖模式下土壤理化性质的调查结果也表明，免耕膜覆垄沟耕作模式将显著提高农田土壤有机质含量，改变田垄和田沟的土壤紧实度，提高土壤的储水能力。Jia等[25]在兰州大学黄土高原半干旱环境监测站开展垄沟种植紫花苜蓿对土壤理化性质的研究也表明，垄沟耕作模式下土壤有机碳含量增加1.8%~14.2%，而对照组平地耕作模式下土壤有机碳含量减少3.5%。Müller等[26]在德国黑森州Lindenbreite试验站中垄沟耕作系统中也发现，垄沟种植模式下土壤微生物生物量碳、氮分别比平地耕种模式高5%和6%。此外，史福刚等[27]基于河南省辉县市垄沟种植夏玉米的大田试验结果表明，垄沟耕作措施能导致田垄土壤孔隙度增大，提升土壤通气透水性能，增加土壤水库容，减少地表径流。Cannon等[28]在英国坎布里亚郡一处缓坡牧场土壤水分特性影响因子分析结果也表明，垄沟耕作模式下土壤水分变化主要受土壤生物扰动、降水侵蚀形成的土壤空隙大小和空间分布的影响。

1.4　垄沟耕作对地下过程的影响

除在干旱半干旱地区作为重要的集水保墒措施外，垄沟耕作模式还被用于湿润气候区农牧业雨季除涝排渍，降低地下水位。如Ogban等[29]选取尼日利亚西南部三处湿润内陆山谷农田评估不同耕作模式对地下水位和玉米产量的影响，结果表明采用垄沟排水模式下地下水埋深平均约为30 cm，而控制对照组的地下水埋深小于15 cm。郭玉和刘龙军[30]基于我国三江平原低湿耕地垄底垄沟深松技术的田间原型观测实验结果表明，暴雨情境下垄沟耕作能够快速产流，缓解涝灾程度。Moffat等[31]基于英国森林复垦计划中三处站点土壤水文物理特性调查结果表明，垄沟种植模式能够显著排出冬季降水，降低研究区地下水位，有效降低涝渍灾害。

2　垄沟耕作对农田水循环过程影响研究方法

当前，垄沟耕作对农田水循环过程影响研究方法包括室内模拟实验方法、农田原型观测试验方法和数值模型模拟方法3种。

2.1　室内模拟实验方法

室内模拟实验能够实现前期实验设计中设定的条件，较精准的控制降水时间、降水强度及垄沟布局等外部实验条件，实验研究过程周期短且便于管理；但受室内模拟实验尺度较小、与自然条件差别大等因素制约，难以系统反映出垄沟耕作对农田水循环全过程的影响，实验结果难以广泛应用于农业生产指导。目前，室内模拟实验方法在垄沟耕作对农田水循环过程影响的研究中应用较少。吕殿青等[32]采用室内模拟降雨实验对比分析了黄土高原丘陵沟壑区垄沟耕作条件下土壤水分入渗、剖面分布以及不同垄压实程度的影响。吕刚等[33]采用室内人工模拟降雨系统分析了辽西低山丘陵区典型土壤类型在不同坡度和降雨强度下发生细沟侵蚀阶段性径流和泥沙变化等。

2.2　大田观测试验方法

大田观测试验方法是在雨养农业区选择具有代表性的农田试验站，通过布设水文、气象、土壤、生态等观测设施，开展天然降雨条件下雨养农田水循环过程监测研究的方法，具有准确、全面反应试验站所在地区垄沟耕作模式下农田水循环变化的实际情况等优点。目前，该方法已被广泛应用于我国及南亚[34]、非洲[35]、北美[36]、澳大利亚[37]、欧洲[38]等世界主要国家和地区雨养农田水循环过程研究中。但是，大田观测试验方法也存在观测过程周期长且成果产出慢、外部条件可控性差、人力物力投入大等不足，取得的研究成果可复制性和可推广性相对较弱，难以在大范围规模化推广应用。

2.3　数值模型模拟方法

数值模型模拟方法是根据农田水文相关基础理论，采用函

数表达式概化田块尺度上降水、蒸发、径流、入渗等水循环过程，建立农田尺度水循环数学模型，模拟预测分析了不同条件下垄沟耕作模式对农田水循环的影响。Benjamin等[39,40]开发了一个模拟农田垄沟系统水热耦合运动的有限元模型，模拟分析了不同耕作模式下土壤物理特征的差异及其对壤中流及热量传输的影响。金建新等[41]采用甘肃省民勤绿洲垄沟滚水流推进试验实测资料与SRFR数值模拟软件建立并率定垄沟灌土壤水分Kostiakov入渗模型的相关参数。陈雪等[42]采用Van Genuchten模型模拟分析了滇中昆明市北郊松华坝迤者小流域典型坡耕地的等高反坡阶下土壤水分特征。

3 基于降水资源高效利用的垄沟布局优化

为了实现雨养农田降水资源的高效利用，部分学者采用数理统计最优化分析方法根据大田实验观测结果对垄沟比、垄台宽等垄沟布局模式进行优化。如Wiyo等[43]根据非洲马拉维4个地区99块农田种植玉米的垄沟大小、形状及玉米生长状况进行统计分析，提出同时考虑雨水收集效率最大化和农田高密度玉米种植的减产作用的垄沟大小和形状设计方法。丁瑞霞等[44]通过宁南旱区垄沟种植谷子实验建立了单位面积谷子籽粒产量与垄宽(或沟宽)的多元线性回归方程，确定宁南旱区谷子种植最优田垄和田沟的宽度均为45 cm。Wang等[10]基于兰州大学旱区农业与生态修复试验站垄沟种植马铃薯的实验结果，建立马铃薯产量与田垄宽度回归方程，确定马铃薯种植最优垄沟比范围为39:60~48:60(cm:cm)。寇江涛等[45]和Jia等[46]分别在甘肃省永登县和兰州大学黄土高原半干旱环境监测站开展旱地垄沟种植紫花苜蓿的不同垄沟宽比对水分利用效率影响的研究，通过回归分析确定采用垄沟模式种植紫花苜蓿的最优垄沟比分别为60 cm:70 cm和60 cm:60 cm。Li等[47]基于中科院黄土高原皋兰生态与农业综合试验站大田实验结果建立作物需水与有效降水的函数关系，通过最优化分析确定在300、400和500 mm降雨区，种植玉米和冬小麦的最佳垄沟比分别为1:1、1:2和1:4；在300 mm降雨区，种植谷子的最佳垄沟比为1:3。

此外，部分学者采用理论分析方法通过数学建模对农田垄沟系统进行优化设计。如金彦兆[48]基于农田垄沟耕作微地形雨水叠加利用模式，以提高水资源利用效率为最优目标，建立不同水分利用条件下微地形雨水叠加利用垄沟比的数学模型。Yang等[49]开发了垄沟播种模式的斥水砂土水热耦合运移数值模型并在西澳大利亚北部小麦种植带进行验证，提出该区应采用南北走向、垄高75 mm、两垄间距250 mm的垄沟布局模式，以降低农田土壤地温和蒸发损失。

4 展 望

当前，国内外相关研究重点关注是垄沟耕作对降水储流、地表产汇流、农田蒸散发、土壤墒情等农田水循环过程单一环节的影响且研究方法相对单一。针对我国雨养农业垄沟耕作模式尚存在关键问题和技术难点，应强化不同时空尺度上农田水循环过程与农田土壤、农作物等双向反馈机理作用研究，进一步明晰雨养农田垄沟布局对关键水循环要素过程影响机理及其时空格局差异；在研究方法上，应强化农田水循环与管理模型在垄沟耕作模式对雨养农业降水资源高效利用和作物产量等影响研究方法体系，建立一套普适性的垄沟耕作优化方法。 □

参考文献：

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's land and water resources for food and agriculture-managing systems at risk: economic botany[R]. Rome, 2011.

[2] 王 浩，杨贵羽，杨朝晖. 水土资源约束下保障粮食安全的战略思考[J]. 中国科学院院刊，2013，28(3)：329-336，321.

[3] 许倬云. 汉代农业：早期中国农业经济的形成[M]. 南京：江苏人民出版社，2002.

[4] QIN S H, ZHANG J L, DAI H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area [J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87-94.

[5] 田 媛，李凤民，刘效兰. 半干旱区不同垄沟集雨种植马铃薯模式对土壤蒸发的影响[J]. 应用生态学报，2007，18(4)：795-800.

[6] 吕晓东，马忠明. 不同耕作方式下春小麦棵间土壤蒸发研究[J]. 西北农业学报，2016，25(4)：547-553.

[7] WADE T. Modeling effects of rainwater harvesting systems on water yield increase and non-beneficial evaporation reduction to sustain agriculture in a water-scarce region of China [D]. Old Dominion University, 2018.

[8] ZHANG W, LI Z, GONG Y, et al. Yield and water use of Siberian Wild Rye with ridge and furrow planting in Northern China [J]. Agronomy Journal, 2013, 105: 1 787-1 796.

[9] TACONET O, CIARLETTI V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 64-76.

[10] WANG Q, ZHANG E H, LI F M, et al. Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for Potato Production in Semi-arid Areas [J]. Water Resources Management, 2007, 22: 1431-1443.

[11] TWOMLOW S J, BRUNEAU P M C. The influence of tillage on semi-arid soil-water regimes in Zimbabwe [J]. Geoderma, 2000, 95: 33-51.

[12] 严冬春，文安邦，龚长文，等. 紫色土陡坡耕地顺坡垄作条件下的土壤及其流失特征[J]. 山地学报，2014，32(3)：314-319.

[13] 李永平，贾志宽，刘世新，等. 旱作农田微集水种植产流蓄墒扩渗特征研究[J]. 干旱地区农业研究，2006(2)：86-90.

[14] JIANG S H, GAO X L, LIANG J B, et al. Effect of different furrow and mulched ridge combined water micro-collecting practice on moisture retention and water saving of spring mung bean-planted farmland [J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(7): 132-140.

[15] 刘目兴，王静爱，刘连友. 沙区旱作农田作物垄沟种植下土壤水分动态观测：太仆寺旗油菜种植试验结果[J]. 干旱区资源与环

境,2005(3):120-125.

[16] 傅永斌,任全军,奚玉银,等.冀西北旱坡地南瓜田间沟垄集雨种植模式研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):31-35.

[17] REN X L, CHEN X L, JIA Z K. Effect of rainfall collecting with ridge and furrow on soil moisture and root growth of corn in Semiarid Northwest China[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 196:109-122.

[18] 顾 贺.地面不同垄沟形式对土壤水分的影响[J].草原与草坪,2012,32(5):1-6.

[19] MCHUGH O V, STEENHUIS T S, ABEBE B, et al. Performance of in situ rainwater conservation tillage techniques on dry spell mitigation and erosion control in the drought-prone North Wello zone of the Ethiopian highlands[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97: 19-36.

[20] KUOTSU K, DAS A, LAL R, et al. Land forming and tillage effects on soil properties and productivity of rainfed groundnut (*Arachis hypogaea L.*)-rapeseed (*Brassica campestris L.*) cropping system in northeastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 142:15-24.

[21] ROBINSON D. A comparison of soil-water distribution under ridge and bed cultivated potatoes [J]. Agricultural Water Management, 1999, 42:189-204.

[22] HULUGALLE N R, RODRIGUEZ M S. Soil physical properties of tied ridges in the Sudan Savannah of Burkina Faso[J]. Experimental Agriculture, 1988, 24:375-384.

[23] 于同艳,张兴义.耕作措施对黑土农田耕层水分的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2007(3):121-124.

[24] 林 静,刘艳芬,李宝筏,等.东北地区垄作免耕覆盖模式对土壤理化特性的影响[J].农业工程学报,2014,30(23):58-64.

[25] JIA Y, LI F M, WANG X L. Soil quality responses to alfalfa watered with a field micro-catchment technique in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2006, 95:64-74.

[26] MULLER E, WOLDHAGEN H, QUINTWEN M, et al. Spatial patterns of soil biological and physical properties in a ridge tilled and a ploughed Luvisol[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105:88-95.

[27] 史福刚,武继承,杨永辉.旱作农业区不同田间集雨措施应用效果研究[J].河南农业科学,2008(9):61-64.

[28] CANNON P M, REID I. The influence of relic ridge-and-furrow on the soil water regime and the plant community of an ancient meadow, Cumbria, England [J]. Global Ecology and Biogeography Letters, 1993, 3:18-26.

[29] OGBAN P I, BABALOLA O. Evaluation of drainage and tillage effect on watertable depth and maize yield in wet inland valleys in southwestern Nigeria [J]. Agricultural Water Management, 2002, 52:215-231.

[30] 郭 玉,刘龙军.垄底垄沟超深松对土壤含水量及大豆产量影响的研究[J].大豆科学, 2006, 25(3):333-335.

[31] MOFFAT A J, ROBERTS C J. The use of large scale ridge and furrow landforms in forestry reclamation of mineral workings [J]. Forestry, 1989, 62:233-248.

[32] 吕殿青,邵明安,王全九.垄沟耕作条件下的土壤水分分布试验研究[J].土壤学报,2003,40(1):147-150.

[33] 吕 刚,贾晏泽,刘雅卓,等.褐土与棕壤坡耕地细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化[J].水土保持学报,2020,34(5):42-48.

[34] SINGH G, LARYEA K B, KARWASRA S P S, et al. Tillage methods related to soil and water conservation in south Asia[J]. Soil and Tillage Research, 1993, 27:273-282.

[35] AINA P O, LAL R, ROOSE E J. Tillage methods and soil and water conservation in West Africa[J]. Soil and Tillage Research, 1991, 20:165-186.

[36] PIKUL J L, CARPENTER-BOGGS L, VIGIL M, et al. Crop yield and soil condition under ridge and chisel-plow tillage in the northern Corn Belt, USA [J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60: 21-33.

[37] TISDALL J M, HODGSON A S. Ridge tillage in Australia: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1990, 18:127-144.

[38] HOLLAND J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: Reviewing the evidence[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 103:1-25.

[39] BENJAMIN J G, GHAFFARZADEH M, CRUSE R. Coupled water and heat transport in ridged soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54:963-969.

[40] BENJAMIN J G, BLAYLOCK A D, Brown H, et al. Ridge tillage effects on simulated water and heat transport [J]. Soil & Tillage Research, 1990, 18:167-180.

[41] 金建新,张新民,徐宝山,等.基于SRFR软件垄沟灌土壤水分入渗参数反推方法评价[J].干旱地区农业研究,2014(4):59-64.

[42] 陈 雪,宋娅丽,王克勤,等.基于Van Genuchten模型的等高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.

[43] WIYO K A, KASOMEKERA Z M, FEYEN J. Variability in ridge and furrow size and shape and maize population density on small subsistence farms in Malawi[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 51: 113-119.

[44] 丁瑞霞,贾志宽,韩清芳,等.宁南旱区沟垄微型集水种植谷子最优沟垄宽度的确定[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):12-16.

[45] 寇江涛,师尚礼.旱地垄沟集雨种植紫花苜蓿最佳沟垄宽比的确定[J].草地学报,2011,19(2):247-252.

[46] JIA Y, LI F M, WANG X L, et al. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment [J]. Field Crops Research, 2006, 97 (2): 167-175.

[47] LI X Y, GONG J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches [J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3):243-254.

[48] 金彦兆.微地形雨水叠加利用垄沟比的几种求解方法[J].中国农村水利水电,2005(6):16-18.

[49] YANG B, BLACKWELL P S, Nicholson D F. A numerical model of heat and water movement in furrow-sown water repellent sandy soils [J]. Water Resources Research, 1996, 32(10):3 051-3 061.