

水土保持耕作措施的研究进展及展望*

欧阳铖人, 吴伯志**

(云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 水土流失是世界各国普遍存在的环境问题之一, 严重威胁着农业的可持续发展。坡耕地是造成水土流失的主要策源地。然而, 坡耕地是山区农业中重要的土地资源。如何有效地控制坡耕地水土流失的同时提高坡耕地的土地生产力, 实现坡耕地农业可持续利用已成为社会各界关注的焦点。水土保持耕作措施是控制坡耕地水土流失的重要措施之一。该措施一是通过改变微地形增加降雨的入渗时间, 削减径流流速及降低其挟沙能力, 如等高耕作和垄作; 二是增加覆盖度来减少雨滴的削弱作用, 如间作和秸秆覆盖; 三是改善土壤物理性质, 增加土壤有机质, 如免耕和深松耕。显然, 水土保持耕作措施具有良好的蓄水保土效应, 许多研究开始关注于这些措施控制水土流失的作用机制, 尽管还不完全清楚。因此, 本文综述了这些水土保持耕作措施控制水土流失的机制, 探讨了这些措施在农业生产实践中存在的问题, 对该措施在农业发展生产中应用提出了几点意见。

关键词: 坡耕地; 水土流失; 水土保持耕作措施; 农业生产

中图分类号: S 157.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-390X (2017) 04-0718-09

A Review of Soil Conservation Practices on Uplands

OUYANG Chengren, WU Bozhi

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Soil erosion is one of the most serious environmental problems, and presents a key challenge to agricultural sustainable development. The unreasonable sloping farmland is an important reason result in soil erosion. However, the sloping farmland is an important land resource. How to effectively control the soil erosion of sloping farmland and improve the land productivity of sloping land, are important. Soil and water conservation practice is one of the important measures to control soil erosion and increase land productivity in sloping farmland. There are three aspects to reduce soil erosion for soil and water conservation practice in sloping farmland. Firstly, the measure increases the infiltration time of rainfall and reduce runoff velocity by changing the surface topography, such as contour tillage and ridging. Secondly, the measure weakens the splash of raindrops by increasing coverage, such as intercropping and straw mulching. Thirdly, the measure increases soil organic matter by improving soil physical properties, such as no tillage and sub-soiling. Soil and water conservation practice plays a key role to reduce soil erosion and improve soil water content in sloping farmland. Most studies are mainly concentrated on the erosion mechanism of soil conservation practices although these mechanisms are not

收稿日期: 2017-03-07 修回日期: 2017-05-16 网络出版时间: 2017-07-19 13:04:00

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20125302110001); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503119); 云南省现代玉米产业体系 (2016)。

作者简介: 欧阳铖人 (1988—), 男, 云南南涧人, 博士研究生, 主要从事作物栽培与耕作学研究。
E-mail: oycr6018@126.com

** 通信作者 Corresponding author: 吴伯志 (1960—), 男, 云南玉溪人, 博士, 教授, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: Bozhiwu@outlook.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20170719.1304.044.html>

completely. Thus, the study summarized the reducing erosion mechanism of soil and water conservation practices and explored the currently problems of these practices in agriculture to prospect of the measure research in the future.

Keywords: arable land; soil erosion; soil conservation practices; agriculture

水土流失是世界各国普遍存在的环境问题之一,已严重威胁着农业的可持续发展^[1-2]。坡耕地是造成水土流失的主要策源地,坡耕地水土流失现象在美国、澳大利亚、中国、印度、肯尼亚、挪威以及西班牙等国十分严重^[3-5]。20世纪90年代,中国年均水土流失量约50亿t,其中,坡耕地水土流失量约15亿t,约占中国水土流失总量的30%,特别是坡耕地比较集中的地区甚至占该区水土流失总量的50%以上^[6]。严重的水土流失不仅破坏地面完整,降低土壤肥力,造成土壤有机质和养分流失,使得坡耕地土层变薄,土地生产能力降低,严重影响农业生产,而且也给生态环境带来严重的危害,导致生态失调,旱涝灾害等频繁发生,阻碍生态农业和社会经济的可持续发展^[7]。然而,坡耕地是山区农业中重要的土地资源,特别是在中国黄土高原、云贵高原等地区,坡耕地分布更为广泛^[3]。更为严峻的是,随着人口数量的增加,人类对粮食的需求促使大规模开垦坡地,人地矛盾日益尖锐,加剧了坡耕地水土流失和土地的退化^[8]。如何有效地控制坡耕地水土流失的同时,合理利用坡耕地,提高坡耕地的土地生产力,实现坡耕地农业可持续利用已成为社会各界关注的焦点^[9-10]。

水土保持耕作措施,简称耕作措施,指的是通过改变微地形,增加地表覆盖或改善土壤物理性质等,提高土壤抗蚀性,减轻土壤侵蚀,防止土壤退化,起到水土保持作用的耕作栽培措施^[11]。该措施一是改变地形增加降雨的入渗时间,削减径流流速来降低其挟沙能力,如等高耕作、垄作^[12-13];二是通过增加覆盖度来减少雨滴的削弱作用,如间作、秸秆覆盖^[14-16];三是改善土壤物理性质,增加土壤有机质,在提高土地生产力的同时增加土壤抗冲性,如免耕、深松^[17-19]。这些耕作措施不仅减少径流、减少对土壤表面的冲刷以及泥沙的搬运、增加土壤水分入渗、改善土壤结构、减少水土流失^[19-20],更为重要的是,该措施能提高土地生产力及作物产量,从而获得良好的经济效益,为坡耕地农业的可持

续发展提供有效的保障^[12]。这种良好的经济效益是工程措施和生物措施无法比拟的。显然,这些耕作措施是坡耕地防治水土流失的有效途径,对现代农业生产和生态环境的保护具有重要意义,在坡耕地的治理中具有广阔的应用前景^[19-21]。然而,尽管这些耕作措施的研究已进行60多年,其蓄水保土效应已经取得良好的效果,但这些耕作措施对水土流失的影响机制及生态和经济效应的研究不完全清楚。近年来,耕作措施如何有效减少水土流失的机制正日益受到社会各界的广泛关注^[12]。因此,本文针对这些耕作措施的水土保持功能,综述这些耕作措施的水土保持作用机制,探讨了耕作措施在农业生产实践中存在的问题,对该措施在农业发展生产中应用提出了几点意见。

1 改变微地形

1.1 等高耕作(contour tillage)

等高耕作(横坡耕作),指的是沿坡面等高线进行横向耕作,起到阻挡水流,增加土壤入渗,减少水土流失的作用,从而促进作物增产,是黄土丘陵沟壑区农民在坡耕地上广泛采用的保土耕作技术措施。其作用机制主要是通过改变土壤微地形,使地表径流分散,影响降雨过程中水分转化与土壤侵蚀过程,增加地表填注量,滞后产流时间,增加水流的入渗,从而达到水土保持目的^[12]。该模式最大的优点是有效减少径流和土壤侵蚀,与传统的顺坡种植相比,等高耕作分别减少20%的径流和42%的土壤侵蚀^[22],从而降低土壤侵蚀速率^[20]。这是因为等高耕作地表微地形起伏最大,这一地表微地形空间特征能够较好地对雨水径流形成拦截效应,提高土壤含水量,减少径流和土壤养分流失。不仅如此,通过研究发现,地表微地形的起伏与土壤表面特性(如地表粗糙度)密切相关。RUIZ等^[23]指出土壤表面特性对坡面地表径流和流失过程具有调控的作用,如:土壤表面碎石对水力侵蚀过程显得尤为重要。因而,等高耕作形成的地表粗糙度对径流和侵蚀的影响成为近年来研究的热点。由此激发人们对

其他耕作方式的地面状况及其水土保持效应的研究,其中一个重要的因素是耕作方式影响地表粗糙度。例如:郑子成等^[24]研究表明:不同耕作方式和降雨强度下,地表粗糙度的变化呈现不同的规律,随降雨强度的增加,人工锄耕、人工掏挖的地表糙度呈先减小后增大的变化趋势。微地形以及地表粗糙度的变化进而影响降雨的入渗速率^[25]。因此降雨拦截入渗是坡耕地水土流失治理的核心^[26]。比较来看,等高耕作水土保持的效应最为明显,土壤入渗率最大,在相同入渗时间情况下,土壤稳渗速率大小排序为等高耕作>人工掏挖>人工锄耕>直线坡^[26]。这一结果得到了其他学者的进一步验证。如吴发启等^[26]对坡耕地不同耕作管理措施强化降水入渗规律进行了研究,表明等高耕作强化降水入渗速率效果最好,认为耕作管理措施改变了坡面微地形,增加了地表粗糙度,使土壤水分入渗性能发生变化。然而,随着坡度的增加,等高耕作的水土保持作用逐步降低^[27]。

1.2 垄作 (ridge tillage)

垄作,即在土壤耕作层筑起垄台和垄沟,作物种植在垄台上的耕作方式。该种植方式在中国具有较为悠久的耕作历史,具有提高地温、防旱抗涝的作用,是黄河流域(华北地区)的主要种植模式^[16]。该措施是防治坡耕地水土流失常用的方法之一,能有效减少山坡地的土壤侵蚀,进而减少土壤中氮和磷等养分流失,降低面源污染的风险^[28]。其作用机制与等高耕作类似,垄作改变地形,拦截和减缓地表径流,延迟产流时间,其水土保持效果明显^[16]。李洪勋等^[21]研究了不同耕作措施对土壤侵蚀的影响,指出开沟起垄种植方式,改变了微地形,能有效地阻挡径流和过滤径流中泥沙。不仅如此,垄作增加土壤蓄水能力,提高水分的利用效率,进而增加作物的产量,是旱区农业的主要集水措施之一^[29]。陈雪等^[30]研究表明:垄作增加地表拦截和减缓地表径流,增强土壤的抗冲蚀和蓄水能力,提高土壤含水量19.3%,减少径流量85%~100%,减少冲刷量90%~100%。然而,垄向分布影响地表径流的拦截效果,不同垄作方向水土保持效果存在差异,顺坡垄作地表产流时间为最早,横坡垄作最晚,且水土流失量仅为顺坡耕作下的60%^[31]。显然,垄作在生产实践中具有较好的应用情景。然而,与等高耕作相似,垄作适用于微地

形变化复杂的缓坡耕地。此外,垄作容易出现前期缺水现象^[32]。

1.3 垄向区田 (ridge farming)

垄向区田指的是在垄沟内每隔一定距离修筑一个略低于垄台的横土挡,将长长的垄沟分割成一节节的浅穴,以土挡拦截降雨,以小区段贮存雨水,直到浅穴中的雨水全部渗入土壤,成为土壤水或深层土壤水的一种水土保持措施^[33]。该技术是水土保持的新技术之一,在东北黑土区的水土流失治理中得到广泛应用,并且取得显著成效。该措施作用机制是改变微地形,拦截和减缓地表径流,增强土壤的抗冲蚀能力。实验表明:在不同坡度上采取垄作区田措施保水保土效果都有大幅度的提高,产流时间延长,减少径流量76.8%,减少冲刷量89.1%,使水土流失得到控制^[34]。不仅如此,垄向区田还具有增加土壤入渗的作用,增加土壤储水量,为农作物生长提供有利的土壤水分环境。与常规耕作相比,垄向区田稳定入渗率提高了41.2%,储水量增加了7.0%,大豆产量提高了7.2%~33.7%^[35]。显然,该技术能够有效地拦蓄降雨径流,缓解了强降雨和土壤渗透慢的矛盾,提高土壤含水量,从而改善作物的生长发育状况,具有简单易行,省工、省时、投资少,不另占耕地等特点,有很好的生态、经济和社会效益^[33]。然而,该措施在长坡以及陡坡地水土保持效果不明显^[33]。

2 增加覆盖度

2.1 等高带状间作 (contour strip intercropping)

等高带状间作是有利于坡耕地水土保持的重要耕作措施之一,指的是沿着等高线将坡耕地分为多个条带,在各条带上交互种植牧草或蔬菜等作物,其水土保持效果得到了许多证据的支持。谢颂华等^[36]研究表明:横坡间作优于顺坡间作,横坡间作小区减少径流量和减沙效应最大。安瞳昕^[37]等发现玉米间作蔬菜和玉米间作牧草均能有效减轻坡耕地水土流失,水土保持效果明显,其中,玉米间作白菜、间作马铃薯、间作辣椒的总侵蚀量分别比玉米单作减少47.0%,43.8%和10.2%。因为玉米间作模式覆盖度高于玉米单作,结果是减少对土壤表面的冲刷以及泥沙的搬运,减少土壤养分的损失。字淑慧等^[38]的研究结果也证实这一点,由于混播草带(非洲狗尾草和三叶

草)增加草带的总盖度,所以混播草带的水土保持效果优于单播草带,水土流失量最小。显然,等高带状间作作用机制是增加作物的覆盖度,减少雨滴的击溅作用,减少了地表径流的产生。该措施对养分和水土流失都起到了防控作用,水土和氮磷养分流失的拦截效果好,是一种长期控制土壤径流和养分流失的种植系统。不仅如此,该措施能显著地增加产量,其增产机制是研究的热点^[36-38]。然而,该措施难以进行机械化操作,限制了农业的生产水平。

2.2 覆盖 (mulching)

2.2.1 秸秆覆盖 (straw mulching)

秸秆覆盖,即利用农作物秸秆覆盖地表,减少地表径流,是水土保持中较为有效的耕作措施之一。该措施的作用机制主要是增加土壤表面的覆盖度,覆盖的作物秸秆削弱雨滴对土壤的打击力,减轻雨滴对地表土壤团聚体的破坏,降雨快速渗入土壤,减少径流的形成,从而减少侵蚀速率^[21]。与裸地相比,秸秆覆盖能显著减少73.9%~86.2%的地表径流,降低32.5%~66.6%的径流总量,并极显著降低土壤侵蚀总量,达96.4%~98.1%^[39]。这是因为秸秆覆盖能推迟产流时间,增加雨水累积量,增加入渗,增加土壤含水量。例如:在土壤含水量10%、降雨强度120 mm/h的条件下,秸秆覆盖能推迟产流时间1~15 min,增加累积入渗量37%~43%,减少径流总量3%~40%,减少土壤侵蚀量10%~80%^[40]。因此,秸秆覆盖率对水土流失的影响便成为研究的热点。一般认为,当秸秆覆盖的覆盖率大于40%条件下能有效地控制水土流失,低于40%时对控制效果不明显^[40]。近年来,研究发现秸秆覆盖极大地改善耕层土壤团粒结构,极显著地提高了表层总有机碳(TOC)含量,增加了土壤肥力^[41]。然而,秸秆覆盖后土壤微生物数量的变化,易发生微生物与幼苗争夺养分的矛盾;秸秆中的虫卵、带菌体等留在土壤里,易发生病虫害,影响作物的生长^[42]。

2.2.2 地膜覆盖 (plastic film mulching)

地膜覆盖是一种农业栽培技术,具有提高土壤温度,抑制杂草生长,减轻病害的作用。同时,地膜覆盖(等高种植)也具有减少水土流失的作用,是一项重要的水土保持措施。其机制是地膜覆盖有效地保护了土壤耕层不受破坏,能减轻大雨或暴雨对地面的冲刷。因为地膜覆盖后土壤水

分入渗增加,增加降雨时的渗透量,延长径流产生时间,减少地表径流降低地表(下)径流和土壤侵蚀量,降低水溶性总氮流失浓度^[43-44]。近年来,地膜覆盖的方式对地表径流和侵蚀的影响成为研究的热点。如4 t/hm²地膜覆盖条件下的径流量远小于2 t/hm²地膜覆盖下的径流量,并显著地提高土壤水分^[44]。ZHANG等^[45]研究表明:地膜覆盖方式显著影响滇池流域的水土流失,宽膜覆盖下径流和侵蚀都显著地低于窄膜覆盖。这是因为地膜覆盖减轻雨滴对地表土壤团聚体的破坏,降雨快速渗入土壤,减少径流的形成。然而,地膜覆盖是一把双面剑,不合理的使用地膜覆盖容易造成环境污染,如地膜覆盖引起的残膜清除不干净,难于降解;地膜覆盖后,膜下土壤含水量降低、温度升高导致养分利用过快,易出现养分不足等问题。另外,根据吴伯志等^[46]的研究,地膜覆盖(顺坡种植)产生较多的径流,其径流量显著高于等高种植,间作和免耕等耕作措施,因为顺坡覆膜后,地膜边缘的土壤疏松,降雨时,大量雨水聚集形成径流,迅速向坡底移动,加剧了水土流失的发生。

3 改善土壤物理性质

3.1 免耕 (no-tillage)

免耕指的是一种不翻动表土,并全年在土壤表面留下足以保护土壤的作物残茬的耕作方式,便于机械化管理,具有省时省工等优点,是公认的减少水土流失重要的保护性耕作措施。其机制是免耕降低雨滴击溅能量,减少土壤结构不被过分破坏,避免土壤团聚体分离,减少径流速率及其对土壤的搬运,从而减少侵蚀量。该措施的优点是增加土壤有机质(碳)含量来改善土壤物理性状,进而增强土壤抗冲力^[47]。与常规耕作模式相比,免耕显著改善土壤理化性质,可分别减少地表径流量和土壤侵蚀量30.2%和7.4%^[47]。美国、巴西、加拿大和意大利等国家十分重视免耕技术的应用,相继开展了大量的研究工作^[48-49],且已有较长的研究历史^[18-19]。近年来,中国等发展中国家也广泛采用该技术^[50]。王立等^[50]比较了传统耕作与免耕秸秆覆盖两种耕作措施下的水土流失规律,表明免耕能有效地减少地表径流量、降低侵蚀量,具有防治坡耕地水土流失的效果。因为免耕能显著改善土壤结构,提高土壤的渗透

性（渗吸率、宏观毛管长度、有效孔径以及饱和导水率）减少了地面径流，增加土壤水分储存量^[51]。因此，免耕可以提高小麦-豌豆轮作系统作物产量以及水分利用效率、促进农田生态系统的良性循环，持续提高土壤肥力^[52]。与传统耕翻相比，长期免耕能显著提高表层土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量，分别提高了 11%、41%、22%、15%、29% 和 27%^[53]。同时，免耕（春小麦和豌豆）分别较常规耕作增加了 28% 和 11% 土层含水量^[54]。然而，长期免耕增加了杂草的竞争力（如多年生杂草），大量的施用除草剂不利于农业的可持续发展。

3.2 少耕 (reduced tillage)

少耕，指在常规耕作基础上尽量减少土壤耕作次数（如隔 1~3 年翻耕 1 次）或在全田间隔播种，减少耕作面积、耕作深度的一种耕作方法，它是介于常规耕作和免耕之间的中间类型该措施。该措施改变了传统的翻耕作业方式，减少土壤的扰动次数，具有省工、节时、高产、高效和保持水土的优点，日益受到许多农业科技工作者的关注。与免耕类似，少耕减少对土壤结构破坏，减少径流和侵蚀。与传统耕作相比，少耕减少 20% 的径流量和 40% 侵蚀量，并显著减少土壤养分的流失^[55]。更为重要的是，与传统耕作相比，少耕显著改善土壤物理性状，增加土壤的透水性，提高土壤表层的有机质含量^[56]。因为少耕显著增加了土壤大团聚体的比例，降低土壤容重，增加土壤导水率，提高土壤水分利用效率^[57-58]。传统耕作模式下水分利用效率为 12.4 kg/(hm²·mm)，少耕模式下达 13.6 kg/(hm²·mm)，较传统耕作提高 9.7%^[59]。然而，由于少耕减少耕作深度，易出现土壤退化的问题。

3.3 深松耕 (sub-soiling)

深松耕指的是用深松铲或凿形犁等松土农具疏松土壤（深度可达 20 cm 以上）而不翻转土层的一种深耕方法。该措施广泛应用于东北黑土区研究，黄土高原半干旱区和豫西旱区^[60-61]。其作用机制是深松打破犁底层、白浆层或粘土硬盘，深松部分通气良好、接纳雨水，而未松的部分土壤紧实，增强土壤的抗蚀性，从而有效地延迟产流时间、减少径流和侵蚀。与常规耕作相比，深松分别减少了 50% 的径流量和 90% 的侵蚀量^[61]。这种“上实下

虚”的土壤结构使得水分快速入渗到土壤中，增加水分的入渗，提高水分、养分的利用效率。有证据表明：深松比传统耕作提高了 16.37% 的水分利用效率，氮、磷和钾的生产效率分别提高了 17.40%、19.80% 和 19.44%，小麦产量提高 23.22%，经济效益提高 29.36%^[62]。因为深松有利于土壤的气体交换，促进好氧性微生物的活化和矿物质分解，增加土壤孔隙度，降低土壤容重，增加土壤有机质含量。与对照区相比，深松区 0~25 cm 土壤容重降低了 0.22 g/cm³，土壤孔隙度增加了 8%^[63]。TAIN 等^[64]研究表明：深松显著增加土壤有机碳 (SOC) 的含量，提高土壤质量，10 年间，深松分别增加了 13.37 MgC/hm² 水稳性团聚体含量和 9.59 MgC/hm² 土壤有机碳含量，其中，74%~82% 的团聚体为大团聚体 (>0.25 粒级)，这些土壤中 (0~30 cm) 含有 53%~87% 的土壤有机碳。可见，深松耕技术对于提高作物种植体系的土壤质量 (有机碳含量) 具有重要的指导意义。然而，在农业生产过程中，现有的深松耕机械难以与深施肥技术的结合，不能完美实现大量底肥深施的问题。

3.4 等高植物篱 (contour hedgerows)

等高植物篱是指在山丘、坡面上沿等高线按一定的间隔，以线状或条带状密植草本植物或多年生灌木，形成能挡水、挡土的篱笆墙以达到防治水土流失的技术。其特点为生产成本低，简单实用，具有良好的生态、经济、社会效益，广泛应用于世界各地热带至温带以山区为主的水土流失地区的水土流失的治理中^[65-66]。例如：中国三峡地区的坡耕地水土保持措施评估中，植物篱的水土保持效果最好，测量的地表径流量和泥沙量最小^[67]。植物篱的显著生态效益是提高土地生产力，集中表现为改善坡耕地土壤理化性质，增加土壤团聚体含量，提高土壤肥力，控制养分流失的作用。因为植物篱显著改善了粒级 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量，增加土壤抗蚀性作用，能有效控制 N 和 P 的流失^[68]。更为深层的原因是植物篱显著提高了坡面 0~20 cm 表层土壤脲酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的含量^[68]。因此，植物篱-农作模式土壤综合抗蚀指数分别比常规横坡农作模式增加 102.9%、91.9%、87.9%、82.9%^[67]。植物篱提高坡面土壤酶活性，增加土壤水稳性团聚体的含量 (>0.25 mm)，改善土壤的理化性质，为坡耕地水土保持提供了新的思路，对于实

现坡耕地资源的有效改良与生态农业的可持续发展具有巨大的应用潜力。然而,短期内植物篱的收益效果不明显,作物产量提高滞后,此外,植物篱加剧了植物篱与农作物之间的竞争(光、水、肥)。

4 展望

耕作措施在农业生产实践中的应用日益受到社会各界的广泛关注。尽管如此,这些措施在理论研究和在实际的生产实践中仍存在问题,还需关注以下几个方面。(1)加强耕作措施的侵蚀机制的理论研究,包括不同耕作措施水土流失发生演变的水动力学过程,径流侵蚀与输沙过程等。(2)建立水土保持耕作措施水蚀预报模型。从多种空间尺度上进行水土流失预测模型的研究,预报各耕作措施下的多年平均土壤流失量,对指导生态环境建设具有重要意义。(3)重视耕作措施在农业生产中的应用。目前,各耕作措施在展现良好的水土保持效果的同时暴露出一些自身的缺陷,如免耕加大除草剂的用量,间作难以机械化操作,秸秆覆盖易发生病虫害,深松耕易伤苗等问题^[69]。因此,关注秸秆覆盖在实际应用中规范化和量化与现代农业机械化的问题;发展有利于等高带状间作的农业机械来满足带状间作栽培体系的现代化发展需求等等的研究有利于推动水土保持耕作措施在生产实践中的应用。(4)水土保持耕作措施地域性及适用性评价。不同气候区域水土流失的类型复杂多样,同样的水土保持耕作措施在不同地区会有不同的效果,须对各种水土保持耕作措施进行不同地域的适用性评价,发展有利与农业生产实践的区域性措施。(5)重视水土保持耕作措施与生态及经济学的研究。研究水土保持措施与农业经济发展的相互关系,寻求水土流失治理的经济对策与方法,具有现实和长远的实践意义。其研究重点主要包括水土保持耕作措施的区域生态研究;水土保持耕作措施的社会经济对策,如多年生豆科作物与粮食作物间套作^[70]及玉米和多年生牧草间套作^[71],改良土壤的同时保持水土、提高经济效益,为农业可持续发展提供积极的新思路。

[参考文献]

[1] PIMENTEL D, HARVEY C, RESOSUDARMO P, et al.

Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 1995, 267 (5201): 1117. DOI:10.1126/science.267.5201.1117.

- [2] VAN OOST K, QUINE T A, GOVERS G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, 318 (5850): 626. DOI:10.1126/science.1145724.
- [3] KOULOURI M, GIOURGA C. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands [J]. *Catena*, 2007, 69 (3): 274. DOI:10.1016/j.catena.2006.07.001.
- [4] SKØIEN S E, BØRRESEN T, BECHMANN M. Effect of tillage methods on soil erosion in Norway [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil & Plant Science*, 2012, 62 (sup2): 191. DOI: 10.1080/09064710.2012.736529.
- [5] GARCÍA - RUIZ J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review [J]. *Catena*, 2010, 81 (1): 1. DOI:10.1016/j.catena.2010.01.001.
- [6] 孙鸿烈. 我国水土流失问题与防治对策 [J]. *中国水利*, 2011 (6): 16. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2011.06.008.
- [7] PIMENTEL D, KOUNANG N. Ecology of soil erosion in ecosystems [J]. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 416. DOI:10.1007/s100219900035.
- [8] 周萍, 文安邦, 张信宝, 等. 坡耕地植物篱在水土保持中的应用 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (4): 108. DOI:10.3969/j.issn.1672-3007.2010.04.020.
- [9] PALM C, BLANCO - CANQUI H, DELERCK F, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 187 (2): 87. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.010.
- [10] MAETENS W, POESEN J, VANMAERCKE M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? [J]. *Earth - Science Reviews*, 2012, 115 (1): 21. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.08.003.
- [11] 吴发启. 水土保持农业技术措施分类初探 [J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10 (3): 111. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2012.03.018.
- [12] 郑子成, 林代杰, 李廷轩, 等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26 (2): 24.
- [13] ALI I, KHAN F, BHATTI A U. Soil and nutrient losses by water erosion under mono-cropping and legume inter-cropping on sloping land [J]. *Pakistan Journal of Agri-*

- cultural Research, 2007, 20 (3/4): 161.
- [14] ZHENG H, HUANG H, LIU J, et al. Recent progress and prospects in the development of ridge tillage cultivation technology in China [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 142 (1): 1. DOI: 10. 1016/j. still. 2014. 04. 001.
- [15] VEGA J A, FERNANDEZ C, FONTURBEL T, et al. Testing the effects of straw mulching and herb seeding on soil erosion after fire in a gorse shrubland [J]. Geoderma, 2014, 223 (5): 79. DOI: 10. 1016/j. geoderma. 2014. 01. 014.
- [16] LE BISSONNAIS Y, CERDAN O, LECOMTE V, et al. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion [J]. Catena, 2005, 62 (2-3): 111. DOI: 10. 1016/j. catena. 2005. 05. 001.
- [17] CAVALIERI K M V, DA SILVA A P, TORMENA C A, et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103 (1): 158. DOI: 10. 1016/j. still. 2008. 10. 014.
- [18] DE VITA P, DI PAOLO E, FECONDO G, et al. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92 (1/2): 69. DOI: 10. 1016/j. still. 2006. 01. 012.
- [19] ZHENG H, ZHANG H, FANG S. Effects of different soil and water conservation tillage on runoff, sediment and soil carbon [C] // Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2011: 268. DOI: 10. 1109/RSETE. 2011. 5964266.
- [20] BARTON A P, FULLEN M A, MITCHELL D J, et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 104 (2): 343. DOI: 10. 1016/j. agee. 2004. 01. 034.
- [21] 李洪勋, 吴伯志. 用径流小区法研究不同耕作措施对土壤侵蚀的影响 [J]. 土壤, 2006, 38 (1): 81. DOI: 10. 3321/j. issn: 0253-9829. 2006. 01. 014.
- [22] MARIOTI J, PADILHA J, BERTOL I. Effect of cropping system and contouring or downland sowing on soil water erosion under no tillage [J]. Egu General Assembly, 2012 (14): 11203.
- [23] RUIZ SINOJA J D, ROMERO DIAZ A, FERRE BUENO E. The role of soil surface conditions in regulating runoff and erosion processes on a metamorphic hillslope (Southern Spain): soil surface conditions, runoff and erosion in Southern Spain [J]. Catena, 2010, 80 (2): 131. DOI: 10. 1016/j. catena. 2009. 09. 007.
- [24] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨条件下耕作方式对地表糙度的溅蚀效应 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (11): 103. DOI: 10. 1016/j. catena. 2009. 09. 007.
- [25] RIBOLZI O, PATIN J, BRESSON L M, et al. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos [J]. Geomorphology, 2011, 127 (1/2): 53. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2010. 12. 004.
- [26] 吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 115. DOI: 10. 3321/j. issn: 1009-2242. 2003. 03. 032.
- [27] 王健, 吴发启, 孟秦倩. 耕作措施对径流能量的影响 [J]. 人民黄河, 2007, 29 (3): 51. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2007. 03. 026.
- [28] CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological applications, 1998, 8 (3): 559. DOI: 10. 1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2.
- [29] 张建新, 郑大玮, 李韬光, 等. 田间集雨措施及其在增加土壤水分含量和作物产量中的作用 [J]. 农业工程学报, 2006, 22 (7): 65. DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-6819. 2006. 07. 014.
- [30] 陈雪, 蔡强国, 王学强. 典型黑土区坡耕地水土保持措施适宜性分析 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6 (5): 44. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3007. 2008. 05. 009.
- [31] 赵玉明, 刘宝元, 姜洪涛. 东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响 [J]. 水土保持研究, 2012, 19 (5): 1.
- [32] 林立金, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 紫色土坡耕地横坡垄作的水土流失特征及作物产量效应 [J]. 水土保持研究, 2007, 14 (3): 254. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3409. 2007. 03. 080.
- [33] 沈昌蒲, 刘立意, 王秋华, 等. 水土保持新技术——垄向区田的基本原理及运用 [J]. 中国水土保持, 2007 (10): 19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0941. 2007. 10. 010.
- [34] 齐智娟, 张忠学, 杨爱峥. 黑土坡耕地几种水土保持措施的蓄水保土效应研究 [J]. 水土保持研究, 2011, 18 (5): 72.
- [35] 王孟雪, 张金萍, 张玉先. 垄向区田技术参数的区定及对坡耕地大豆产量及水分利用效率的影响 [J].

- 水土保持研究, 2011, 18 (2): 233.
- [36] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (9): 81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.013.
- [37] 安瞳昕, 李彩虹, 吴伯志, 等. 玉米不同间作方式对坡耕地水土流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 21 (5): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2007.05.005.
- [38] 字淑慧, 段青松, 吴伯志. 混播草带防治坡耕地水土流失效应的研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22 (5): 61. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2006.05.014.
- [39] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (22): 6091.
- [40] 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15 (1): 9.
- [41] 逢蕾, 黄高宝. 不同耕作措施对旱地土壤有机碳转化的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (3): 110. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2006.03.027.
- [42] 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (5): 519. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2013.00519.
- [43] 罗付香, 林超文, 涂仕华, 等. 氮肥形态和地膜覆盖对坡耕地玉米产量和土壤氮素流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (6): 11.
- [44] MONTENEGRO A, ABRANTES J, DE LIMA J, et al. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall [J]. *Catena*, 2013, 109 (10): 139. DOI: 10.1016/j.catena.2013.03.018.
- [45] ZHANG G S, ZHANG X X, HU X B. Runoff and soil erosion as affected by plastic mulch patterns in vegetable field at Dianchi lake's catchment, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 122: 20. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.02.004.
- [46] 吴伯志, 刘立光. 不同耕种措施对坡地红壤侵蚀率的影响 [J]. 耕作与栽培, 1996 (5): 17.
- [47] SASAL M C, CASTIGLIONI M G, WILSON M G. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 108 (1-2): 24. DOI: 10.1016/j.still.2010.03.010.
- [48] CASTELLINI M, VENTRELLA D. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124 (4): 47. DOI: 10.1016/j.still.2012.04.008.
- [49] ARSHAD M A, FRANZLUEBBERS A J, AZOOZ R H. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada [J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53 (1): 41. DOI: 10.1016/S0167-1987(99)00075-6.
- [50] 王立, 黄高宝, 王生鑫, 等. 粮草豆隔带种植保护性耕作水土流失规律 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (2): 54.
- [51] LIU Y, GAO M, WU W. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130 (6): 7. DOI: 10.1016/j.still.2013.01.012.
- [52] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39 (1): 89. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2002.01.013.
- [53] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29 (10): 5508. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.10.040.
- [54] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应 [J]. 生态学报, 2006, 26 (4): 1176. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.04.027.
- [55] LEYS A, GOVERS G, GILLIJNS K. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interrill runoff and erosion reduction [J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (6): 1425. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2007.00947.x.
- [56] LARSBO M, STENSTRÖM J, ETANA A. Herbicide sorption, degradation, and leaching in three Swedish soils under long-term conventional and reduced tillage [J]. *Soil and Tillage research*, 2009, 105 (2): 200. DOI: 10.1016/j.still.2009.08.003.
- [57] DARAGHMEH O A, JENSEN J R, Petersen C T. Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam [J]. *Geoderma*, 2009, 150 (1): 64. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.01.007.
- [58] DARAGHMEH O A, JENSEN J R, PETERSEN C T. Near-saturated hydraulic properties in the surface layer of a sandy loam soil under conventional and reduced tillage [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (6): 1728. DOI: 10.2136/sssaj2007.0292.
- [59] 代快, 蔡典雄, 张晓明, 等. 不同耕作模式下旱作玉

- 米氮磷肥产量效应及水分利用效率 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (2): 74. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.012.
- [60] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响 [J]. 水土保持研究, 2011 (2): 14.
- [61] 金轲, 蔡典雄, 吕军杰, 等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (4): 1. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2006.04.001.
- [62] 李友军, 黄明, 吴金芝, 等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2006 (2): 42. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2006.02.011.
- [63] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响 [J]. 土壤通报, 2011 (3): 709.
- [64] TIAN S, WANG Y, NING T, et al. Continued no-till and sub-soiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106 (1): 212. DOI:10.2134/agronj2013.0288.
- [65] MUTEGI J K, MUGENDI D N, VERCHOT L V. Combining napier grass with leguminous shrubs in contour hedgerows controls soil erosion without competing with crops [J]. *Agroforestry systems*, 2008, 74 (1): 37. DOI:10.1007/s10457-008-9152-3.
- [66] GUTO S N, PYPERS P, VANLAUWE B. Tillage and vegetative barrier effects on soil conservation and short-term economic benefits in the central Kenya highlands [J]. *Field Crops Research*, 2011, 122 (2): 85. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.03.002.
- [67] SHEN Z Y, GONG Y W, LI Y H. Analysis and modeling of soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir Area in China [J]. *Catena*, 2010, 81 (2): 104. DOI:10.1016/j.catena.2010.01.009.
- [68] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征 [J]. 应用生态学报, 2013 (1): 122.
- [69] 武琳, 黄欠如, 叶川, 等. 香根草篱对红壤坡耕地坡面土壤酶活性的影响 [J]. 土壤, 2013, 45 (4): 673.
- [70] VALENTIN C, AGUS F, ALAMBAN R. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia; impact of rapid land use changes and conservation practices [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 128 (4): 225. DOI:10.1016/j.agee.2008.06.004.
- [71] WU K X, W B Z. Potential environmental benefits of intercropping annual with leguminous perennial crops in Chinese agriculture [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188 (4): 147. DOI:10.1016/j.agee.2014.02.026.