

土壤扩蓄增容技术研究现状与展望

吴淑芳^{1,2}, 张永东², 冯浩², 霍云云³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 武威市水利技术综合服务中心, 甘肃 武威 733000)

摘 要:干旱缺水与水土流失是黄土高原地区并存的环境顽症,是导致该区生存条件落后、生态环境恶化的根本原因。而通过扩大土壤水库容量、增加土壤入渗能力、提高降雨利用率,是实现缓解干旱缺水和防治水土流失双重目标的根本途径。从保护性耕作、水土保持工程措施及土壤改良剂三方面对国内外有关土壤扩蓄增容技术的研究应用进行了系统深入的评述,在此基础上探讨了这些技术存在的问题,并对其发展趋势进行了展望,重点指出:单项技术措施尽管在一定程度上能够达到保水、保土、保肥的目的,但其仍有很大的局限性,不可能解决水、土方面的所有问题。因此发展新的技术措施体系并配合传统方法,形成复合技术措施,才能充分利用土壤水库库容、高效利用雨水资源,提高土壤储水量,从根本上解决植物生长需水问题。

关键词:保护性耕作; 水土保持工程措施; 土壤改良剂; 土壤扩蓄增容技术

中图分类号:S157.2; S157.42

文献标识码:C

文章编号:1005-3409(2013)02-0302-07

Review and Prospect on Technology of Soil Magnistorge Compatibilization

WU Shu-fang^{1,2}, ZHANG Yong-dong², FENG Hao², HUO Yun-yun³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Wuwei Service Center for Integrated Water Technology, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: Drought, water shortage and soil and water loss are the couple of persistent environmental issues which are the basic reason responsible for the backward survival conditions and ecological environment deterioration. Enlarging soil reservoir, increasing soil seepage ability and improving rainfall use efficiency are the basic ways to relieve drought and water insufficiency and effectively control soil and water loss. Therefore, a systematical and thorough comment on technology of soil magnistorge compatibilization was given from the aspects of conservation tillage, engineering measures for soil and water conservation and soil amendment at home and abroad. On this basis, the existing problems and the development trend of these technologies were discussed. Furthermore, it also emphasized that individual technology measure had significant limitations to deal with all the problems on the aspects of water and soil although it can achieve the purposes of water, soil and fertilizer conservation. Therefore, developing new systems of technical measures which are combined with traditional methods to form integrated technical measures can make a full use of soil reservoir, rainfall resources and increase soil water storage. Only through these ways, the problems of water demand for plant growth can be attacked thoroughly.

Key words: conservation tillage; engineering measures for soil and water conservation; soil amendment; technology of soil magnistorge compatibilization

干旱缺水与水土流失是黄土高原地区并存的一对
环境顽症,是导致该地区生存条件落后、生态环境恶化
的根本原因。一方面,降雨时期集中、暴雨频繁,使得

坡面降水往往以超渗产流的形式形成滚滚水流冲刷土
壤,导致严重的水土流失;另一方面,有限的降水是该
区多数地方最大可供利用的水源,但由于降雨时空分

布不均,且降雨利用率仅为 30%~40%,造成约有 60%~70%的雨水资源以径流或无效蒸发的形式离开地表,原本干旱缺水的局面进一步加剧^[1]。显然,通过扩大土壤水库容量、增加土壤入渗能力,提高降雨利用率,是缓解该区干旱缺水 and 水土流失的根本途径。

早在 20 世纪 80 年代,我国著名土壤学家朱显谟院士依据黄土“点棱接触支架式多孔结构”特性及其渗透性好、蓄水量大、植物易生长等特点,相继提出了“维持土壤水库,确保黄土高原山川秀美”、“抢救土壤水库,治理黄土高原生态环境”、“重建土壤水库是黄土高原治本之道”等科学理念^[2]。基于对黄土高原地区气候、土壤、植被、地形等环境因子的综合考虑,该区相继发展了水保农业、集雨补灌农业、径流林业以及相配套的各种耕作措施、集雨方式和节水灌溉技术,充分利用降水资源,提高土壤水分含量,使该区农业生产和生态修复取得了显著成效^[3-4]。然而,尽管黄土土壤水库库容较大,但“蓄水”较少,加之黄土疏松多孔、蒸发强烈,该区土壤干层现象普遍发生,许多地方的植被恢复情况不容乐观。如许多地方出现的“小老头树”林,它们常年以消耗深层土壤水分作为代价获得一定的物质生产,引发了严重的土壤“干层”,最终导致植被大面积退化甚至死亡,“土壤水库”多年难以恢复^[5]。据调查,黄土局部地区 2 m 深土层内,土壤水库每年平均实际贮水量为 190 mm,只占田间持水量的 41%,比最适宜贮水量少 190 mm;半干旱区为 230 mm,平均只占田间持水量的 42%,比最适宜贮水量少 220 mm^[6]。这意味着,即便是平水年份,干旱区和半干旱区土壤水分也属于严重缺乏等级,土

壤贮水量远远不能满足植物的生长需求,土壤水库还有很大的利用空间。

目前我国生态农业应用广泛的措施有:保护性耕作措施,聚流坑、入渗孔等水土保持工程措施以及改良土壤结构的土壤改良剂等技术,这些技术措施在某种程度上都可以发挥土壤的扩蓄增容功能。然而,这些单项技术措施虽然在一定程度上能够达到保水、保土、保肥的目的,但其仍有很大的局限性,不可能解决水、土方面的所有问题。本文认为,必须将这些单项措施配套应用形成复合技术体系,充分利用土壤水库库容、高效利用雨水资源,提高土壤储水量,才能从根本上解决植物生长需水问题。基于上述分析,本文主要从保护性耕作、水土保持工程措施及土壤改良剂三方面对国内外有关土壤扩蓄增容技术的研究应用进行系统深入的评述,在此基础上探讨这些技术存在的问题,并对其发展趋势进行展望,以期对今后该技术的研究应用有所启发。

1 保护性耕作

保护性耕作是指通过少耕、免耕、地表微地形改造技术及地表覆盖、合理种植等综合配套措施,减少农田土壤侵蚀、保护农田生态环境,并获得生态、经济及社会效益协调发展的可持续农业技术。其核心技术包括少耕、免耕、等高耕作、沟垄耕作、秸秆覆盖等农田土壤表面耕作技术及其配套的专用机具等,配套技术包括覆盖种植、作物轮作、带状种植、多作种植、合理密植、农田防护林建设等^[7]。其具体分类、各种措施的适宜条件及适宜地区如表 1 所示。

表 1 水土保持耕作措施种类

类别	耕作措施	适宜条件	适宜地区
以改变微地形为主	等高耕作	25°以下坡度;坡愈陡作用愈小	全国
	水平沟种植法	25°以下坡度;坡愈缓作用愈大	西北(华北)
	抽槽聚肥耕作	平地、15°以下坡度;造林、建设经济园林	湖北(南方)
	垄作区田	20°以下坡度;年降雨量 300 mm 以上	全国
以增加地面覆盖为主	地膜覆盖	缓坡或梯田、平地;经济作物、果树等	全国
	留茬覆盖	缓坡、平地;不翻耕	黑龙江(北方)
	秸秆覆盖	缓坡、平地;不翻耕	山东(北方)、云南
以改变土壤物理性状为主	少耕深松	缓平地,平地;深松铲	黑龙江、宁夏(北方)
	少耕覆盖	缓坡地、平地;5 a 以上要全面深耕,尚待研究	云南(南方)
	轮耕	风沙旱地、风沙区	全国
	免耕	平地;用除草剂	湖北、东北

在美国,保护性耕作作为一个完整成功的技术模式,目前实施范围已达到 50%。研究表明,该技术实施后,耕地土壤对自然降水的蓄积由 102 mm 增加到 183 mm,蓄水量由降水量的 19% 提高到 40%^[8]。加拿大从 20 世纪 60 年代开始引进保护性耕作技术,截

至 2002 年,保护性耕作技术应用面积已经达到 1 300 万 hm²,占全国耕地的 30%^[9]。我国是主要的干旱国家之一,目前,旱作农业的面积约 3 300 万 hm²。近几年来,我国逐步开展了保护性耕作的试验、示范和推广,取得了较好的成效,为大规模实施保护性耕作

积累了成功的经验^[10]。

保护性耕作可以减少径流,降低土面蒸发,增加土壤的入渗能力,这是由于保护性耕作首先减少了土壤的翻动,有效地增加了地表粗糙度,阻挡了雨水在地表的流动,稳定和增加了土壤的孔隙度,其次地表覆盖可以减少太阳对土壤的照射,降低土壤表层温度,阻挡水汽的上升,使土壤水分的蒸发大大减少,从而达到减少径流与蒸发,增加地表水分入渗,控制土壤侵蚀,减少水土流失的目的。最后,保护性耕作在减少对土壤扰动的同时,也保持和改善了土壤结构,可以显著改善土壤理化性状,提高土壤有机质及土壤表层的 N,P,K 含量,同时还可增加土壤生物和微生物的数量和活性,最终达到扩大土壤水库容量、增加土壤入渗能力、培肥地力及作物增产增收的目的。其实质是通过减少对土壤的扰动,充分调动土壤的自我调节能力,从而实现“三少两高”的目标,即少动土、少裸露、少污染、高保蓄、高效益。

王晓燕^[11]在模拟降雨条件下研究了秸秆覆盖、表土耕作对入渗的影响,发现保护性耕作与传统耕作相比,地表产生径流晚、水分稳定入渗率高,在同等条件下,随着秸秆覆盖率的增加,径流量呈二次曲线减少,秸秆覆盖可明显减少水土流失。Qin 等^[12]研究指出与比传统耕作相比,免耕可增加土壤贮水量 10%,减少土壤蒸发约 40%,耗水量减少 15%,水分利用效率提高 10%。姚宇卿^[13]指出,高留茬深松覆盖技术可以减少降雨中的产流量及径流次数,大幅度降低径流中 NO₃-N 的浓度及流失量;王育红等^[14]研究了保护性耕作技术对豫西坡耕地土壤养分的影响,结果表明:0—20 cm 耕层土壤进行保护耕作特别是深松后,土壤养分含量明显高于传统耕作,肥料利用率提高了 10%。

自“六五”以来,国家科技部等部门对保护性耕作

的保水保肥效应进行了长期定位的研究,在理论研究和生产实践中积累了一定的经验,取得了一定的成效。然而我国的保护性耕作尚存在许多配套技术问题:目前尚未形成与种植制度相适应的土壤耕作体系和轮耕制;缺少适合不同地区、不同种植制度的保护性耕作专用配套机具;由于秸秆覆盖难于耕作,当覆盖量达到一定程度时可抑制杂草生长,但同时又影响作物的播种,如何协调二者之间的矛盾尚需解决;作物残茬覆盖引起的病虫草害变化、大量使用除草剂和农药造成的环境污染、土壤表面处理技术及与其他农艺技术措施综合配套等问题都亟需解决。

2 水土保持工程措施

水土保持工程措施是指通过坡面治理工程、沟道治理工程的实施,改变地形状态,防止水土流失。目前,常见的水土保持工程措施包括坡面工程措施(水平沟、鱼鳞坑、梯田等)和沟道工程措施(淤地坝等)^[15]。水土保持工程措施可以有序调控地表径流,减少土壤冲刷,增加土壤入渗率,是一种有效利用土壤库容、提高地表植被覆盖的途径。

2.1 梯田

梯田是山区、丘陵区常见的一种基本农田,是在坡地上沿等高线修成阶台式或坡式断面的田地。它可以改变地形坡度,拦蓄雨水,增加土壤水分,防止水土流失,达到保水、保土、保肥的目的,与改进农业耕作技术结合,能大幅度地提高产量。所以,梯田是改造坡地,保持水土,全面发展山区、丘陵区农业生产的一项有效的措施。

目前,我国的梯田主要包括水平梯田、反坡梯田、坡式梯田、隔坡梯田、波浪式梯田、复式梯田和隔坡水平沟。对不同梯田模式研究的简要总结与分析见表 2。

表 2 不同类型梯田及其特点

研究者	梯田类型	特点
余峰等 ^[16]	水平梯田	梯田土壤容重减小,土壤毛管孔隙度增加;承雨面积增加;拦蓄降雨,就地入渗,增加土壤水分
王进鑫等 ^[17]	反坡梯田	缩短坡长,增加坡度,增加蓄水量,增强地力,促进作物增产增收,防止水土流失。减少修复梯田的劳力和种植农作物的水、肥投入,提高经济效益
邓嘉农等 ^[18]	坡式梯田	截短坡长、减缓坡度、动土量少、提高治理速度、节约工程投资、有效控制水土流失、增产作用明显;应设池、渠、凼和蓄、排、灌结合的坡面水系措施
李清河等 ^[19] 、 马荣亮等 ^[20]	隔坡梯田	降雨进行再分配,阻拦泥沙、保持水分、增加土壤含水量、培肥养分和提高作物产量;工程量减少,缩短建设时间,节省劳动力、减少工程投资,加快水土流失治理速度,具有投资少,见效快的功效
梁占岐等 ^[21]	隔坡水平沟	坡地变为沟坡相间的农田,具备拦蓄地表径流的能力,加上深翻后,土壤孔隙度增大,入渗能力增强,提高蓄水保墒的效能;采取高低相间的种植结构,水肥充足,通风透光,是增产的必要措施

总结表2可知,梯田建设是控制坡耕地水土流失的重要措施,能有效拦蓄坡地径流,防止水土流失,使跑水、跑土、跑肥的“三跑田”变成保水、保土、保肥的“三保田”,大幅度提高坡耕地蓄水保墒培肥能力和土地产出效益,这对坡地水土资源高效利用具有实际指导意义,是解决粮食生产问题、实现农业可持续发展的关键措施之一。

2.2 鱼鳞坑

鱼鳞坑是指为减少水土流失,在山坡上挖掘的交错排列、类似鱼鳞状的半圆型或月牙型土坑,它具有一定的蓄水能力,在坑内栽树可保土、保水、保肥,是地形破碎条件下造林整地的重要方式。

据调查,陕北地区在20世纪50年代后期曾大力推广了坡耕地上呈“品”字排列的鱼鳞坑种植技术,不仅能够有效拦截坡面径流,增加土壤水分,而且有鱼鳞坑育林比无鱼鳞坑育林的林木增长率提高了12倍,提高拦蓄地表径流能力65%,提高拦蓄年径流量 $14.11\text{ m}^3/\text{a}$,提高树冠涵水能力3倍^[22]。黄土高原实施鱼鳞坑措施,通过对原状土进行不同程度的扰动,使得土壤的容重、孔隙度等发生变化,进而影响到土壤水分入渗性能。蔡进军等^[23]对鱼鳞坑整地后的土壤入渗性能和规律进行了分析研究,结果发现,鱼鳞坑工程整地后,土壤的稳渗速率提高了16.22%。王晶等^[24]对陕北黄土区鱼鳞坑的土壤水分变化进行了研究,发现鱼鳞坑施工简单,在拦蓄地表径流、保持水土、促进林木生长等方面作用比较显著,因此适合广泛应用。马红彬和谢应忠^[25]探讨了黄土丘陵区地表干扰恢复措施对土壤水物理性质的影响,指出鱼鳞坑措施下土壤容重变化不大,但土壤黏粒含量、毛管孔隙和持水性下降,水分有效性和水分盈亏状况改善。不过,也有学者指出尽管鱼鳞坑能达到蓄水保土的作用,但在鱼鳞坑设计规格方面仍存在很多问题。吴淑芳等^[26]通过野外径流小区模拟实验表明:长 \times 宽 \times 深为 $20\text{ cm}\times 60\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的鱼鳞坑措施在降雨强度较大时,其拦蓄径流的作用会迅速失效,而且侵蚀量剧增。王丽华和崔振宇^[27]认为在植被水土保持功能与鱼鳞坑的共同作用下,会使坡面径流的拦蓄超过了自然植被状态下的拦蓄量,从而破坏了自然径流状态,如果在流域内采用的鱼鳞坑面积过大,标准较高,低于设计标准的降雨将达不到蓄满产流条件,不产生径流,即使通过下渗产生径流,也会导致蒸发量增加,产流减少,汇流滞后,破坏了蓄水工程的正常调节和引水工程的设计引水流量。

2.3 其他工程措施

水土保持工程措施除梯田和鱼鳞坑外,还包括很

多能有效减缓坡度、减少径流、扩大土壤水库容量、提高土壤入渗能力及土壤养分含量的措施,如水平沟、水平阶、淤地坝、聚流坑、入渗孔等。很多学者也对这些措施的保水、保土、保肥的作用进行了研究。李苗苗等^[28]在自然降雨条件下研究了反坡水平阶对不同坡度下坡耕地的蓄水减沙效益,发现其对产生的径流能起到调控作用,同时可以阻止泥沙的产生;杨绍兵等^[29]采用野外监测和室内实验分析相结合的方法,对坡耕地反坡水平阶土壤水分、N、P垂直再分配进行了研究,发现在0—100 cm土层,反坡水平阶处理能有效地将坡耕地地表径流转化为土内径流,造成土壤水N、P质量分数呈现出不同程度的增高趋势。徐小玲等^[30]通过实地考察,应用无定河流域典型淤地坝土壤水分的实测记录和统计分析方法,对淤地坝的水资源效应进行了探讨。研究发现淤地坝蓄水减水效益非常明显,三个流域所有淤地坝至少可以减少地表水资源 88.75 万 m^3 ,对无定河径流量减少的贡献率为0.093%。甘肃省定西地区水保所针对黄土丘陵沟壑气候干旱、年降雨量少、作物生长期缺水严重的特点,从充分利用坡面径流和增加农田土壤水分入手来提高农作物产量,在坡耕地发展了一种渗水孔聚流技术,按照 $13\ 000\text{ 个}/\text{hm}^2$ 的密度,挖出直径25 cm,深度70 cm的入渗孔,使坡面径流利用率提高30%~40%,降雨利用率提高68%^[31]。

尽管梯田、鱼鳞坑、水平沟等水土保持工程技术措施对解决局部地区植被干旱缺水问题能够起到明显的作用,但某些情况下比如发生暴雨时,这些单项技术拦蓄径流的作用往往会迅速失效。因此,需要发展与这些单项技术相配套的复合技术措施体系,进一步增加入渗、提高储水量,更好地解决黄土高原地区的干旱缺水 and 水土流失问题。梁改革等^[32]利用WEPP模型对不同梯田模式下春玉米生育期需水耗水过程进行了计算,结果表明:单一模式隔坡梯田不能完全解决春玉米需水与天然来水在时间上的错位问题;结合水窖,不但能大量节约土地资源、满足作物需水,且隔坡梯田作物年产量、作物水分利用效率和降水利用效率较无隔坡条件均增加50%以上,基本实现作物增产和减少水土流失的双重目标。唐小娟等^[33]发现,当坡面挖出直径10 cm,深度60 cm的入渗孔时,在模拟暴雨条件下,当入渗孔与帕特草结合以及入渗孔填埋与土拌施的PAM组合措施,其拦蓄径流与泥沙的作用表现得非常显著。贾生海和程建萍^[34]研究发现无纺布覆盖水平沟对土壤有一定的保温作用,可以调节土壤温度,缓解土壤温度的变幅;无纺布有细密孔眼,覆盖水平沟后充分利用了天然降

雨,能提高土壤含水率。无纺布覆盖进行水平沟造林能达到保温和节水作用,促进植被生长,对黄土高原地区坡地造林和荒山绿化具有较好的推广应用价值和实际意义。

3 土壤改良剂

近些年,以施用土壤改良剂为主要手段的化学改良法受到很高的关注,大量实践表明这种措施能够有效改善土壤物理结构,减少土面蒸发,增加土壤降雨入渗能力,保持水土,防止沙化,同时也能对土壤的养分状况及土壤微生物产生积极的影响,提高土地的生产力。近年来,人工合成的土壤结构改良剂种类越来越多,常见的种类包括水解聚丙烯腈(HPAN)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(PAM)、沥青乳剂(ASP)等。目前,国外应用最多的化学改良剂是聚丙烯酰胺(PAM)。美国在地面灌溉中广泛采用 10 g/m^3 浓度 PAM 以增加灌溉水入渗量^[35];以色列利用阴离子型 PAM 和多聚糖(PSD)混合物用于土壤调理剂,增强土壤结构的稳定性和改善土壤物理特性,防治土壤侵蚀^[36];还有一些石油产品丰富的国家,使用化工原料的土壤改良剂大面积应用于固沙造林^[37]。Busscher 等^[38]研究发现 PAM 可有效改善土壤结构,使土壤大团聚体数目增加,土壤表面粗糙度增大,土壤容重降低,土壤总孔隙度和毛管孔隙度增大,进而使土壤颗粒和孔隙结构保持稳定,使土壤入渗率和土壤含水量明显提高。Mikkelsen 等^[39]认为 PAM 与土壤混合能增加土壤对 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 K^+ 、 PO_4^{3-} 的吸附量,减少其淋溶损失,PAM 施用量越大,作用越大。我国有机、无机、天然等各种功能的单一型及混合型的土壤结构改良剂研究开发成果也有不少。吴淑芳、冯浩^[40-41]等人研究表明,高聚物的施用可以显著减少土壤侵蚀,并能有效增加土壤孔隙,改善土壤水分通透性。杨永辉等^[42]通过保水剂、秸秆覆盖、灌水等措施的实施,对冬小麦收获后土壤样品物理、化学特性进行了研究,结果表明:不同保水措施均增加了土壤有机质含量,降低了土壤密度,提高了土壤结构的稳定性,降低了土壤团聚体的分形维数,减少了土壤水分无效蒸发,提高了土壤入渗能力。除此之外,我国诸多学者还研制了各种功能的改良剂,比如以壳聚糖及其衍生物和土壤有益活性微生物为主要组分的“土壤生态改良增效剂”^[43]、由生物化学反应剂和可溶性硅酸盐组合反应制成的“土壤生物反应剂”^[44]、以作物秸秆、城乡废弃资源等为原料施加有机肥料等加工制成的“土壤扩蓄增容肥”^[45]、粉煤灰与若干有机固体废弃物(如污泥)的混合物等各种功能的土壤改良

剂^[46]。若能合理施用,这些化学材料对改良农田、沙地,提高土壤有机质,增强土壤稳定性、提高作物产量均具有显著效果。

不过,这些化学改良剂并未在黄土高原地区的植物根域微集水区中大面积应用。并且目前使用的方法大多都是将改良剂与土拌施后覆盖于地表,若遇到较强降雨,不但不能有效增加土壤水库容量,还可能引发更严重的水土流失。因此,针对黄土区土壤持水性能差,结构均一,土壤水分严重缺乏,植被因缺水、缺肥不能正常生长的状况,急需发展与土壤改良剂技术相结合的复合措施,达到快速改善土壤结构的目的,从而更有效地发挥其保水作用。有研究表明,两种土壤结构改良剂混合使用,或土壤改良剂与有机肥、化肥同时施用能起到改良土壤理化性状、提高土壤养分含量的双重作用,并显著提高作物产量。以脱硫石膏为主要材料添加天然有机类物质制成有机—无机土壤改良剂,可使盐渍化土壤迅速脱盐、并能防止其碱化^[47]。

4 土壤扩蓄增容技术存在的问题及展望

土壤扩蓄增容技术的实施,对黄土高原侵蚀地区的治理和生态环境的建设能起到关键的作用。综上所述,保护性耕作、水土保持工程、化学改良剂等各种增渗保水技术都能够在一定程度上改善土壤水分状况,促进农作物或植被的生长发育。但每种单项措施都有其局限性,也不可能解决水分方面的所有问题。特别是在我国的黄土高原地区,降雨集中、暴雨频繁,水土流失严重,同时蒸发强烈、入渗量少、储水量低,干旱缺水,生态环境问题形势相当严峻。因此发展新的技术措施体系并配合传统方法,更好地利用雨水资源、促进植被恢复,刻不容缓。针对这些问题,本文也对土壤扩蓄增容技术的发展趋势进行了展望,认为亟待开展以下方面的研究:

(1) 针对保护性耕作、水土保持工程、土壤改良剂等单项技术措施对解决局部地区植被干旱缺水问题的局限性,需要发展与这些单项技术相配套的植物根域微集水复合技术措施,进而提高植物根域水分入渗能力和储水量,缓解植物的干旱缺水问题。如在保护性耕作方面,应形成与种植制度相适应的土壤耕作体系和轮耕制;在水土保持工程措施方面,应将工程措施与植被措施相结合,并设置一定的集水蓄水设施;在土壤改良剂方面,研究开发天然—合成共聚物改良剂或将不同改良剂配合施用,特别是生物改良剂与工农业废弃物的配合施用,无机固体废弃物与有机固体废弃物的配合施用等。

(2) 关于土壤扩蓄增容技术的作用机理,特别是其对微地形区、坡面产流和产沙、蓄水面入渗的内在影响,并未引起人们的足够重视,需要说明这些技术对径流、土壤水分入渗、土壤储水量状况的具体影响以及发挥增渗保水作用机制,这不仅可为实施保护性耕作、水土保持工程、土壤改良剂等技术措施提供理论依据,确保措施的安全性、高效性,而且有助于将这些措施的“被动拦蓄”作用提升到“集水与拦蓄并重”的新阶段。

(3) 大力研究发展物理、化学、生物相结合的综合技术措施,发展集水、保水、供水一体化的土壤扩蓄增容技术,这将更有效地充分利用土壤水库库容、更加高效地利用雨水资源,提高土壤储水量,从根本上解决植物生长需水问题。

参考文献:

- [1] 吴普特,冯浩,牛文全,等.中国用水结构发展态势与节水对策分析[J].农业工程学报,2003,19(1):1-6.
- [2] 朱显谟.重建土壤水库是黄土高原治本之道[J].中国科学院院刊,2006(4):320-324.
- [3] 吴普特,高建恩.黄土高原水土保持与雨水资源化[J].中国水土保持科学,2008,6(1):107-111.
- [4] 吴淑芳,冯浩,吴普特.干旱半干旱地区径流林业研究进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(4):150-154.
- [5] 王志强,刘宝元,路炳军.黄土高原干旱半干旱区土壤干层水分恢复研究[J].生态学报,2003,23(9):1944-1950.
- [6] 李凤民,徐进章,孙国钧.半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展[J].生态学报,2003,23(9):1901-1909.
- [7] 张海林,高旺盛,陈阜,等.保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J].中国农业大学学报,2005,10(1):16-20.
- [8] Guzha A C. Effect of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage[J]. Soil and Tillage Research, 2004,76(2):105-114.
- [9] 邸颖.浅谈国内外保护性耕作发展概况[J].农业经济,2008(3):35-36.
- [10] 孙传生,黄长海,朱大为,等.东北黑土区水土保持保护性耕作措施探讨[J].水土保持研究,2006,13(5):30-31.
- [11] 王晓燕.保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J].中国农业大学学报,2001,6(6):42-47.
- [12] Qin H L, Gao W S, Ma Y C, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage for two years[J]. Agricultural Sciences in China,2008,7(1):88-95.
- [13] 姚宇卿.保护耕作对豫西旱地冬小麦产量及效益的影响[J].干旱区农业研究,2002,20(4):42-44.
- [14] 王育红,姚宇卿,吕军杰.保持耕作技术对豫西旱坡地土壤养分的影响[J].安徽农业科学,2002,30(3):414-415.
- [15] 黄奕龙,傅伯杰.黄土高原水土保持建设的环境效应[J].水土保持学报,2003,17(1):2932.
- [16] 余峰,董立国,赵庆丰,等.宁夏半干旱地区梯田土壤水分动态变化规律研究[J].水土保持研究,2007,14(1):298-300.
- [17] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥.反坡梯田造林整地工程对坡面产流的作用机制[J].农业工程学报,2004,20(5):292-296.
- [18] 邓嘉农,徐航,郭甜,等.长江流域坡耕地“坡式梯田+坡面水系”治理模式及综合效益探讨[J].中国水土保持,2011(10):4-6.
- [19] 李清河,李昌哲,李亚军,等.宁南山区隔坡梯田灌溉试验效益分析[J].中国生态农业学报,2001,9(2):45-47.
- [20] 马荣亮,朱立军,杨晓珍,等.茹河流域水土保持工程隔坡梯田应用研究[J].水土保持通报,2008,28(6):135-137.
- [21] 梁占岐,崔崴,董志宏.草地小流域治理水平沟适宜间距初探[J].水土保持研究,2007,14(2):24-28.
- [22] 孙盛辉.鱼鳞坑在治理水土流失中的应用[J].水利科技与经济,2005,11(9):570.
- [23] 蔡进军,李生宝,蒋齐,等.宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J].水土保持通报,2010,30(1):22-26.
- [24] 王晶,朱清科,云雷,等.黄土高原不同规格鱼鳞坑土壤水分状况研究[J].水土保持通报,2011,31(6):76-80.
- [25] 马红彬,谢应忠.地表干扰恢复措施对土壤水分物理性质的影响:以宁南黄土丘陵区典型草原土壤为例[J].安徽农业科学,2009,37(36):8067-8069.
- [26] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J].农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [27] 王丽华,崔振宇.采用鱼鳞坑治理水土流失应注意的几个问题[J].吉林水利,2004(7):28-32.
- [28] 李苗苗,王克勤,陈志中,等.不同坡度下反坡水平阶的蓄水减沙效益[J].水土保持研究,2011,18(6):100-104.
- [29] 杨绍兵,王克勤,陈志中,等.坡耕地反坡水平阶对土壤水 N、P 垂直再分配的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(1):56-60.
- [30] 徐小玲,延军平,梁煦枫.无定河流域典型淤地坝水资源效应比较研究:以辛店沟、韭园沟和裴家崾为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(12):77-83.
- [31] 石生新.整地造林措施对强化降雨入渗和减沙的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):54-59.
- [32] 梁改革,高建恩,韩浩,等.基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化[J].中国水土保持科学,2011,9(1):24-32.
- [33] 唐小娟,金彦兆,高建恩.复合坡度下雨水高效集蓄利

- 用模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 74-76.
- [34] 贾生海, 程建萍. 无纺布覆盖水平沟对土壤温湿度的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 91-94.
- [35] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92(4): 75-162.
- [36] Akhter J, Mahmood K, Malik K A. Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea Plant [J]. *Soil and Environment*, 2004, 50(10): 463-469.
- [37] Silberbush M, Sorek S, Yakirevich A. K⁺ uptake by root systems grown in soil under salinity: I. A Mathematical model[J]. *Transport in Porous Media*, 1993, 11(2): 101-116.
- [38] Busscher W J, Novak J M, Caesar-tonthath T C. Organic matter and polyacrylamide amendment of Norfolk loamy sand [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 171-178.
- [39] Mikkelsen R L, Behel A D, Williams H M. Addition of gelforming hydrophilic polymers to nitrogen fertilizer[J]. *Fertilizer Research*, 1993, 36(1): 55-61.
- [40] 吴淑芳, 吴普特, 冯浩, 等. 高分子聚合物防治坡地土壤侵蚀模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 19-22.
- [41] 冯浩. 高分子聚合物对土壤物理及坡面产流产沙特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 15-19.
- [42] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 70-75.
- [43] 黄庆禄, 李明德, 常锋, 等. 土壤生态改良增效剂对土壤改良效果及对辣椒产质的影响[J]. 湖南农业科学, 2006(5): 64-66.
- [44] 张鹰, 郭跃刚, 芮宜群, 等. 一种土壤生物反应剂改良土壤和石英砂的效果[J]. 土壤, 2009, 41(5): 853-855.
- [45] 王珍, 冯浩, 吴普特, 等. 土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 114-119.
- [46] 牛花朋, 李胜荣, 申俊峰, 等. 粉煤灰与若干有机固体废弃物配施改良土壤的研究进展[J]. 地球与环境, 2006, 34(2): 27-34.
- [47] 邵玉翠, 任顺荣, 廉晓娟, 等. 有机-无机土壤改良剂对滨海盐渍土降盐防碱的效果[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1527-1532.

(上接第 301 页)

参考文献:

- [1] 忻州市统计局. 忻州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [2] 贺金红, 廖允成, 胡兵辉, 等. 黄土高原坡耕地退耕还林草还草的生态经济效应研究[J]. 农业现代化研究, 2006, 27(2): 110-114.
- [3] 郑纪勇. 退耕还林(草)过程中陕北粮食问题初探[J]. 生态经济: 专家论坛, 2004(9): 46-50.
- [4] 冬梅. 退耕还林草对我国宏观粮食安全影响的实证分析[J]. 中国软科学, 2006(4): 46-54.
- [5] 封志明, 张蓬涛, 宋玉. 西北地区退耕对粮食生产的可能影响[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 299-306
- [6] 高雪松, 邓良基, 凌静. 基于系统平衡的四川省耕地面积预测研究[J]. 四川农业大学学报, 2007, 25(4): 436-446.
- [7] 姚慧敏, 张锡金, 朱振林. 济南市粮食安全与耕地数量变化的相关分析[J]. 山东农业科学, 2008(1): 87-89.
- [8] 石丽丽, 谷建才, 何淑娟. 河北省退耕还林对粮食生产的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 104-107.
- [9] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [10] 张圣勤. MATLAB 7.0 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.