关于中国水土流失研究中若干理论问题的新见解

张信宝

(中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041)

摘　要：[目的] 探讨中国不同地区有关水土流失问题的根源，为水土保持研究提供理论依据，为青年学者提供学术研究的思路和方法。[方法] 在大量的野外考察和学术交流基础上，利用各种形式的信息资料，重点从地质学角度分析有关水土保持问题。[结果] 简要阐明了对 5 个水土流失问题的新认识：晋陕蒙接壤区砒砂岩与鄂尔多斯地台油气和铀矿藏的关系，优先流与黄土高原冲沟的形成和塬区地下水的来源，华南崩岗的侵蚀与治理，下伏亚黏土不透水层对东北黑土侵蚀的影响和西南喀斯特坡地土壤的地下漏失等。[结论] 水土保持科学是密切结合生产实际的应用学科，应该首先服务国家生态文明建设的需求。研究工作者要善于发现问题，敢于质疑权威，综合运用多学科的知识解决问题。只有这样才能保证我们的学术研究沿着正确的方向不断进步。



关键词：水土流失问题；砒砂岩；黄土高原冲沟；华南崩岗；东北黑土侵蚀；喀斯特地下漏失

文献标识码：C　　**文章编号**：1000-288X(2019)06-0302-05　　**中图分类号**：S157

文献参数：张信宝. 关于中国水土流失研究中若干理论问题的新见解[J]. 水土保持通报，2019，39(6)：302-306. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 06. 045；Zhang Xinbao. New opinions on several theoretical issues in researches of soil erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 302-306.

New Opinions on Several Theoretical Issues in Researches of Soil Erosion in China

Zhang Xinbao

(*Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: [Objective] The causes of soil erosion in various regions in China were discussed in order to provide theoretical basis for researches on soil and water conservation, and to enlighten young researchers in the academic research. [Methods] According to a large number of field investigations and academic exchanges, using information from various sources, the issues in soil and water conservation were analyzed mainly from the view of geology. [Results] Brief description of new opinions on five soil erosion issues: the relationship between the feldspathic sandstone in the contiguous area of Shanxi Province-Shaanxi Province-Inner Mongolia and the oil and gas fields and the uranium deposits in the Ordos Platform; preferential flow and its effects on the gully formation and groundwater recharge in the tableland of Loess Plateau; collapsed gully erosion and its control in South China; influences of the underlying mild clay on erosion of the black soil in Northeast China; and soil leaking on karst slops in Southwest China. [Conclusion] The science of soil and water conservation is an applied subject closely combined with practices, and should firstly serve for the needs of national ecological civilization construction. Researchers should be good at discovering problems, dare to doubt authorities, and solve the problems with comprehensive and multidisciplinary knowledge. Only in this way can we ensure that our scientific researches continues to progress in the right direction.

Keywords: **soil erosion issues; feldspathic sandstone; gullies in Loess Plateau; black soil erosion; Karst soil leaking**

收稿日期：2019-10-09　　**修回日期**：2019-11-16

资助项目：国家自然科学基金项目“近百年来淤成土断代的$^{210}Pb_{ex}$蓄积—衰变模型”(41873025)

第一作者：张信宝(1946—)，男(汉族)，江苏省镇江市人，研究员，博士生导师。曾任国际大陆侵蚀委员会副主席。主要从事水土保持和山地灾害研究。

近年来,作者先后对中国晋陕蒙接壤区砒砂岩、黄土高原冲沟、华南崩岗、东北黑土侵蚀和西南喀斯特坡地土壤侵蚀等问题进行了大量现场考察,并不断与同行交流和探讨,逐步形成了关于水土流失研究中若干理论问题一些新的认识。本文重点从地质学角度对有关水土流失问题进行分析。现将有关问题陈述如下,以求抛砖引玉,为新时期水土保持研究提供理论借鉴,为青年学者提供学术研究的思路和方法。

1　关于晋陕蒙接壤区砒砂岩与鄂尔多斯地台油气和铀矿藏的关系问题

砒砂岩是指分布于晋陕蒙接壤地区以红色和白色色调为主的,主要由砂岩、粉砂岩及泥岩组成的半固结碎屑岩组合,包括二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系地层[1]。由于该套岩层组合固结程度低,极易发生风化剥蚀,该区重力侵蚀尤为强烈,是黄土高原侵蚀最剧烈的区域,虽然它的面积只占黄土高原总面积的 5%,但是它年均输沙量却占约 22%,被中外专家称为"世界水土流失之最"和"环境癌症"[1]。这些地层在晋陕蒙接壤区之外的地区,岩层沙粒间胶结程度尚好,结构强度不低,水土流失并不严重。我从事国家"七五"攻关项目《黄土高原地区综合考察》的"黄土高原重力侵蚀"专题研究时,曾试图用"上覆岩层厚度小,压力低,成岩程度低",解释砒砂岩沙粒间胶结程度差的原因[2]。笔者认为,这种解释无法圆满解释砒砂岩特征。

2016 年 9 月,中央电视台科技频道报道了内蒙东胜特大型砂岩铀矿,使我深受启发。该节目提出东胜铀矿的形成与鄂尔多斯盆地的油气输移有关,油气携带成矿物质由南向北输移,在北部伊盟隆起东胜一带沉积下来形成铀矿;东北部晋陕蒙接壤区构造开口,油气逸散,没有油气田,也没有铀矿。节目中还提及油气还原性强,具有溶解砂岩的沙粒间胶结物质的作用,我意识到这可能是砒砂岩沙粒间胶结程度差,固结程度低的根本原因。

之后,本人查阅了一些文献[3],逐渐形成了关于"砒砂岩"成因的新认识。红层漂白现象记录反映了浅表层油气运移、经过的行迹,是证明油气是否曾经存在及其逸散规模的重要证据。盆地东北部砂岩漂白现象与地层中天然气向北运移并逸散密切相关。天然气为酸性还原性气体,当还原性气体进入红层时,通过与 Fe^{3+} 的化学还原反应,生成可溶性物质之后从红层中移开,从而红层被漂白。流体漂白岩石的同时,也溶解了岩石沙粒间的碳酸盐胶结物质,导致其固结程度降低,形成砒砂岩。天然气逸散改变了铀成矿体系的氧化还原电位,为铀成矿提供了有利的环境,形成了巨型铀矿矿藏。

鄂尔多斯盆地为南低北高,总体向西缓倾的大单斜。北部伊盟隆起为地质历史上多期发育的古隆起,是油气的长期运移方向。鄂尔多斯盆地的油气和铀矿均主要分布于中生代地层,从盆地的油田—气田—铀矿—漂白砂岩分布状况可知,油田分布于盆地的南部,气田分布于中部,北部伊盟隆起无中生代油气田分布。东胜铀矿位于隆起的中东部,层状的砂岩铀矿矿体分布于氧化还原过渡带。伊盟隆起东部的东胜铀矿以东地区与晋西扰褶带交汇,断裂发育,鄂尔多斯盆地向北东开口,天然气大量逸散,漂白砂岩广泛分布。漂白砂岩分布区往往有油苗出露,是天然气逸散的残留物。由于天然气沿断裂逸散,因此漂白砂岩不限于中生代地层,二叠石盒子组地层也有漂白砂岩分布。

2　关于优先流与黄土高原冲沟形成和塬区地下水来源的关系问题

2016 年 8 月,我参加了在甘肃省庆阳市召开的中国黄土论坛暨国际黄土研讨会。长安大学彭建兵教授对报告中一张 PPT 的解释"黄土垂直节理两侧的黄土湿度偏高,表明黄土中也有优先流"。这个现象引起了我的注意。优先流(preferential flow)"指土壤在整个入流边界上接受补给,但水分和溶质绕过土壤基质,只通过少部分土壤体的快速运移"(搜狗百科)。优先流是世界近期土壤水分研究的热点,我立刻将其与黄土高原的冲沟发育联系起来,推测水分以优先流的形式沿垂直节理向下入渗,两侧黄土含水量增加,碳酸钙胶结物被溶解,力学强度降低,易于发生侵蚀,形成冲沟。由于化学溶蚀,冲沟头部可能存在陷穴,还可能发生管道侵蚀(pipe erosion)。这些现象在野外都可以看到。我参加了会后的野外考察,考察路线为庆阳市—延安市—壶口瀑布—洛川县—西安市。我和土壤水分研究的后起之秀王云强谈起了垂直节理—优先流—黄土冲沟的想法,并在野外进行了现场解释,得到了在场专家学者的认可。土壤水分的研究多在黄土塬或梁峁的中部开展,那些地貌部位黄土垂直节理密闭,土壤水分基本均匀向下入渗,一般不发生优先流。黄土塬或梁峁的边缘部分,由于卸荷效应,垂直节理张开,利于土壤水分以优先流形式向下入渗,形成冲沟"(图 1)。

20 世纪 90 年代初,李玉山先生与我讨论黄土高原土壤水的问题时说,塬区土壤水的研究表明,降水入渗的深度不可能超过几米,黄土塬区几十到几百米深的地下水不知从何而来。关于黄土优先流的新认识,使我想到了黄土塬区地下水的来源。塬区谷坡部

位，由于卸荷作用黄土垂直节理张开，新老滑坡裂缝发育，利于土壤水以优先流的方式入渗迁移，遇到古土壤层或基岩等不(弱)透水层，水分向塬或梁峁中央部位水平迁移，侧向补给塬面区的地下水。也就是说，塬区谷坡部位是塬区地下水的补给区。



图 1 黄土高原梁峁丘陵边缘沿垂直节理发育的冲沟(张信宝摄于 200511)

2019 年 4 月，我参加了董志塬固沟保塬治理工程的考察，当地的工程技术人员现场指出了沟头和沟坡的陷穴(当地俗称灌眼)，参加考察的同志一致认可了优先流的存在。当地的固沟保塬治理工程卓有成效，措施配置科学实用，我将其总结为“埂—路—池—管(沟)—井—坝”治理工程体系。塬边埂用来阻挡塬面径流下沟；埂边路用来防止径流入渗和集流；涝池用来蓄水，调节径流；管(沟)—涝池进水可采用沟或管道，涝池—消力井—沟底之间必须采用管道；消力井用来消能；谷坊坝用来防止沟谷下切，稳定谷坡。埂边路的一个重要作用，就是填实陷穴，防止径流以优先流方式通过陷穴向下入渗。

3 关于华南地区的崩岗侵蚀问题

崩岗是厚层风化壳发育的华南花岗岩丘陵区常见的一种地质灾害，由“崩口”和其下方的冲沟组成。前人多用普通的边坡失稳和冲沟发育的机理解释崩岗的发生与演化，本人感到难以信服。因为崩岗很少发生于其他岩土组成的坡地。2005 年我有幸赴江西、湖南二省调研南方水土保持，有意识地考察了一些崩岗。受 1983—1986 年在新西兰研究土流期间看过的一篇用超压密黏土(overconsolidated clay)理论，解释 20 世纪 50 年代英国伦敦黏土公路边坡失稳的文章[4]的启发，我提出了崩岗失稳的岩石风化膨胀机理的观点，撰写了《崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨》一文[5]。该文的主要观点是，不同于碎屑岩成岩压实形成的超压密岩土，花岗岩风化壳是岩石风化膨胀形成的超压密岩土。在长期的热带亚热带气候条件下，花岗岩风化强烈，致密完整的花岗岩风化为沙、土碎屑的结合体。由于碎屑颗粒粒间孔隙的出现，风化岩土体积增大，发生膨胀。风化壳中下部岩土由于上覆土层压力，风化碎屑颗粒间的孔隙不能自由舒展，处于压闭状态，存在膨胀应力。一旦风化壳坡地被冲沟切开，陡立边坡风化壳岩土强度小于膨胀应力时，坡体突然失稳，崩塌发生。

2019 年 8 月以后，我分别赴江西省的赣县、于都、宁都和兴国县，广东省的德庆、五华县，再次对赣南崩岗和广东崩岗进行了考察。通过考察前的文献[6-10]阅读和考察期间的实地观察，对华南崩岗有了进一步的认识。

(1) 崩岗的定义。据搜狗百科描述，华南广大风化壳坡地上发育着各种形状的深切山坡崩陷凹地形，其冲沟沟头部分经不断地崩塌和陷蚀作用而形成一种围椅状侵蚀地貌，称之为崩岗。笔者的定义是：热带、亚热带地区，岩石风化形成的膨胀压密厚层土体组成的坡地上，冲沟沟头部分经不断地崩塌和陷蚀作用而形成一种围椅状侵蚀地貌。此定义强调了土体的膨胀压密特性(图 2)。

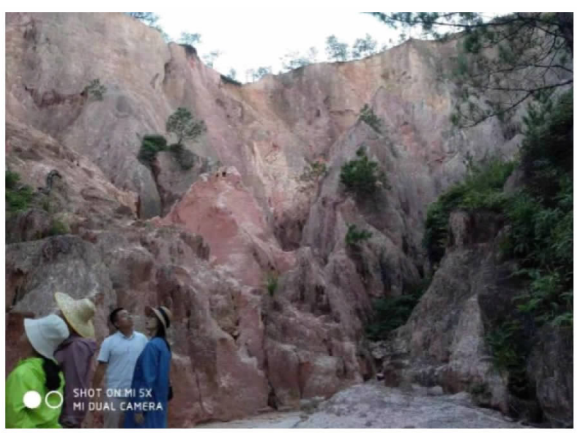


图 2 广东省五华县的崩岗(张信宝摄于 201909)

(2) 崩岗的物质基础。花岗岩或含较多长石等易风化成土矿物等岩石的厚层风化壳。崩岗发育的华南花岗岩厚层风化壳剖面由上而下分别为：①红土层；②风化膨胀压密沙土层；③含酥碎岩块的风化膨胀压密沙土层；④球状风化层(岩石完全酥碎，压密沙土层极少粒度大于 2 cm 的砾石，透水性极差)。由于水分难以通过密实沙土层入渗，崩岗沟往往雨后不久就干涸；由于岩石完全酥碎，压密沙土层极少粒度>2 cm 的砾石，因此沟道和冲积扇比降小，多<2%。台湾岛、海南岛、闽东、粤东和香港等地，由

于山地隆升和侵蚀强烈等原因,厚层风化壳难以保存,花岗岩山地无崩岗发育。

(3) 优先流与崩岗的形成发育。压密沙土层透水性极差,径流只能沿岩土孔、裂隙以优先流形式入渗,软化孔、裂隙两侧风化膨胀压密沙土层,降低抗冲性,利于冲沟形成;降低抗剪强度,利于崩塌发生。水分下渗到沙土层中或与球状风化层过渡带中的软弱带,促进滑坡活动。植物根系穿透土层形成的裂隙可能是崩岗土体优先流的主要通道。实地观察到马尾松根系形成的深达近 10 m 垂直裂隙。浅根型的地带性常绿阔叶林(树种)被深根型马尾松替代的植被演替,可能是历史时期以来华南地区崩岗发生的重要诱因之一。

(4) 崩岗治理。20 世纪 50 年代史德明等人在总结群众崩岗治理经验基础上,提出的"上拦、下堵、中间削"的治理模式总体上是科学的[6]。基于崩岗的形成机理和驱动力,结合现在的经济发展水平,笔者认为稳定山体型崩岗,可采用开发治理模式(平沟、梯化、建果园)进行治理。据调查,随着植被的恢复和生态环境的改善,近年来崩岗发生面积呈萎缩的态势。笔者认为,这可能与植被恢复,增加蒸腾耗水,减少水分入渗,促进坡体稳定有关[7-10]。

4　关于东北地区黑土的侵蚀问题

东北黑土侵蚀是国内近年来水土流失研究的热点问题之一[11-14]。作者于 2019 年 10 月 8—10 日参与了黑龙江省海伦和克山两县的黑土侵蚀考察。通过考察前的文献阅读[11-14]和考察与交流,产生了对东北黑土侵蚀形成的粗浅认识。(1) 黑土下伏岩土的性质对黑土侵蚀有重要的影响(依次为黄土状亚黏土,河湖相砂泥岩夹砾石层),亚黏土层和泥岩层为不透水层。(2) 由于不透水层的存在,黑土层壤中流发育,是东北黑土侵蚀强烈(坡面侵蚀,侵蚀沟)的重要原因。北美一些黑土下伏的冰碛物,透水性好,这些黑土的侵蚀不如东北黑土强烈。(3) 东北黑土年内有 3 个强烈侵蚀期:4 月融雪侵蚀与冻土不透水层有关;6 月降雨侵蚀与植被稀疏有关;7—8 月雨季集中降雨侵蚀与黄土状亚黏土和泥岩不透水层有关。(4) 融雪和特大暴雨时,黑土坡地的浅层地下水位可能接近地表,坡面侵蚀要考虑孔隙水压力(扬压力)。(5) 侵蚀沟分类:①浅沟型:沟底位于黑土与下伏亚黏土层界面附近,深度多小于 0.5 m;②切沟型:沟底位于黑土/亚黏土层界面以下深度 1～2 m 附近,部分沟壁浅层滑塌发育;③冲沟型:沟底与黑土/亚黏土层界面的垂距大于 1～2 m,沟壁不稳定,崩塌,滑坡发育。(6) 侵蚀沟治理模式。①浅沟型:中科院东北地理研究所海伦站的盲沟(暗管)+秸秆打捆充填治理措施,针对了壤中流发育,浅层地下水位高的特点,科学性强,成效显著;②切沟型:海伦站拟开展在盲沟+秸秆充填的浅沟治理措施上,布设垂向入渗砾石墙和加大盲沟管径,促进径流入渗和排泄能力的切沟治理试验研究,有望取得成功。黑龙江水土保持科学研究院的连续柳跌水柔性治理措施也是成功的。③冲沟型:小流域综合治理模式。沟缘线以上的坡面,路沟工程归顺径流,防止径流无序下沟。克山县利用路面导水,将暴雨径流排到坡面上设置的林地或草地散流坡,避免路水下沟的措施非常有效。沟道中以柳树生物桩谷坊为骨干的柳条沟柔性治理措施,大型冲沟要考虑用刚性拦砂坝;沟坡的主要治理措施为恢复植被。对于威胁村镇和交通安全的大型冲沟,建议参考黄土高原庆阳市合水县等地"固沟保塬"的《埂—路—池—管(沟)—井—坝》治理工程体系。

5　关于西南地区喀斯特坡地土壤的地下漏失问题

2006 年 11 月,我参与考察了昆明市—贵阳市—桂林市一线。在昆明市到贵阳市的考察路途中,我注意到不同于花岗岩风化壳剖面的基岩—弱风化带—强风化带——土壤的逐渐变化,碳酸盐岩风化壳剖面是岩土突变,直接接触。我还注意到土下的或暴露地面不久的石灰岩表面光滑如镜,长期暴露地面的石灰岩表面粗糙不平,溶蚀纹沟发育。我们对这些现象进行了热烈的讨论,但未得其解。随后,考察了中国科学院地球化学研究所研究碳酸盐风化壳的平坝剖面。该剖面红土层和下伏白云岩也是突变接触,我们在岩土界面处和红土层中下部发现了大量密集的擦痕,擦痕表面光滑(图 3)。观察岩土界面附近土样的切片,可见其擦痕在显微镜下更加清晰。



图 3　贵州省平坝县白云岩风化壳岩土界面处土体中的擦痕(张信宝摄于 200611)

大量密集的擦痕表明,碳酸岩盐风化壳的岩土界面处和上覆土体下部发生有土壤蠕滑现象。“土壤蠕滑”机制可以成功地解释风化壳岩土直接接触和土下岩石表面光滑的现象:土下碳酸盐岩表面化学溶蚀强烈,岩石溶蚀后产生的孔裂隙,被上覆塑性土体以蠕滑的方式充填,造成土石突变、直接接触。土体充填下伏岩石表面溶蚀后产生孔隙的过程中,不可避免地要摩擦岩石表面,土下岩石表面光滑如镜是土体长期磨蚀岩石表面的结果。长期出露地面的岩石,在差异性溶蚀和溅蚀的作用下,岩石表面粗糙。花岗岩风化壳发育过程中,风化形成的黏土矿物体积远大于长石等原生矿物,不可能出现溶蚀孔隙和土壤蠕滑现象,因此风化壳剖面的岩土呈渐变过渡。

土壤蠕滑现象的发现,使我逐渐形成了关于喀斯特坡地土壤流失的完整理解[4]。不同于非喀斯特坡地的土壤流失几乎全为地面的流水侵蚀,喀斯特坡地的土壤流失是化学溶蚀、重力侵蚀和流水侵蚀叠加的结果,流失方式不仅有地面流失,还有地下漏失。纯碳酸盐岩石质山地,可以看作为一个布满“筛孔”的石头“筛子”,溶沟、溶槽和洼地为被土壤塞住的形状不一,大小不等的“筛孔”,“筛孔”内的土壤,通过地下漏失,充填土下化学溶蚀和管道侵蚀形成孔隙和孔洞,部分进入地下暗河[15]。坡地径流也通过“筛孔”迅速渗入地下,因此喀斯特坡地径流系数多不到 0.05,远低于 0.4~0.6 的流域径流系数。根据硬化路面径流系数高(>0.8)的特点,我们开展了“田间道路集水面+蓄水池”试验工程研究,其蓄水、排水效果很好。2010 年西南地区发生大旱,王世杰研究员和我共同撰写了“关于解决我国喀斯特石漠化地区农田干旱缺水问题的建议”,并获得回良玉副总理的批示。

喀斯特坡地土壤地下漏失现象的发现,得到了学术界大部分同仁的认可。“十三五”国家科技攻关的 4 个喀斯特石漠化治理专项指南,均将地下漏失列为主要研究方向。遗憾的是,这一科学认识还没有传播到石漠化地区的基层干部和技术人员中,导致一些地区石漠化治理出现了不科学现象。如云南省开远县在石漠化坡地上,挖机修梯田营造湿地松林。石漠化坡地的少量土壤多呈土楔状垂直分布于石灰岩浅层裂隙中(俗称鸡窝土),降水产流以优先流的方式沿垂直的土石界面下渗。挖机修梯田,挖穴,松动岩土,扩大了裂隙进而促进了径流入渗,鸡窝土吸收的水分减少。另外,梯田整地,将深部的鸡窝土,翻到表层,促进土壤水分的地面蒸发,减少了植物能够利用的水分。2019 年 9 月,我现场给当地林业局的同志讲了以上的道理,避免了后续一个 10 亿元的造林项目再犯类似错误。

6 结 论

水土保持科学不同于数学等基础理论学科,是密切结合生产实际的应用学科。水土保持研究应首先服务国家生态文明建设需求,综合运用多学科的知识进行研究。同时要敢于质疑权威和前人的论断,善于敏锐发现问题[16],勤于思考,勇于探索。这样才能保证我们的学术研究沿着正确的方向不断进步。

[参 考 文 献]

[1] 王愿昌 吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.

[2] 唐克丽,陈永宗.黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M].北京:中国科技出版社,1991.

[3] 马艳萍.鄂尔多斯盆地东北部油气逸散特征及其地质效应[D].西安 西北大学,2007.

[4] Britto A M, Kusakabet O. Stability of unsupportted axisymmetric exavations in soft clay[J]. Geotechnique, 1982,32(30):261-270.

[5] 张信宝.崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨[J].中国水土保持, 2005(7):10-11.

[6] 郭廷辅.长江流域水土保持[M].武汉:长江出版社,2014.

[7] 刘希林.全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J].地理科学进展, 2018,37(3):342-351.

[8] 熊平生.中国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀基本问题研究综述[J].亚热带水土保持,2016,28(4):28-32.

[9] 阮伏水.福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J].山地学报,2003,21(6):675-680.

[10] 吴恒.梧州市花岗岩风化壳工程地质研究及垂直分带[J].工程地质学报,1994,2(4):43-52.

[11] 崔明,蔡强国,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):29-34.

[12] 刘宝元,阎百兴,沈波,等,东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.

[13] Hu Gang, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan, et al. The characteristics of gully erosion over rolling hilly black soil areas of Northeast China[J]. J. Geogr. Sci. 2009, 19:309-320.

[14] 冯志珍.东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D].陕西 杨凌 西北农林科技大学,2018.

[15] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.

[16] 张信宝.环境地学科研故事[M].成都:四川科技出版社,2017.