

长江中上游地区土壤入渗规律研究

朱冰冰¹, 张平仓², 董峰², 任红玉²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 利用双环法对长江中上游水土流失严重区的 37 个县(市)进行原位测试, 对其典型土壤的入渗规律进行了系统的研究。结果表明, 在长江中上游地区, 利用蒋定生公式和 Horton 公式对土壤入渗过程拟合的精度高于 Philip 方程和 Kostiaikov 经验公式; 土壤稳渗速率与容重呈负相关, 与孔隙度、 $> 0.25 \text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量、有机质含量以及粉/黏呈正相关关系; 不同类型土壤特性不同, 而使土壤稳渗速率随土类发生有规律变化, 黄壤系列土类最大, 然后是石灰土、紫色土, 红壤系列土类稳渗速率最小; 土壤稳渗速率在长江中上游地区呈现规律性的地域分异。四川盆地以及毕节地区是稳渗速率极高值区, 陕南和陇南地区、三峡库区以及丹江口库区是稳渗速率高值区。金沙江下游地区以及湘东赣南红壤丘陵区是稳渗速率一般区, 土壤稳渗速率的空间分异与长江流域目前的重点产沙区相对应。

关键词: 长江中上游地区; 土壤入渗; 稳渗速率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)04-0043-05

中图分类号: S152.7+2

Infiltration Process in the Middle and Upper Reaches of the Yangtze River

ZHU Bing-bing^{1,2}, ZHANG Ping-cang², DING Wen-feng², REN Hong-yu²

(1. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Infiltration process in the typical soils in the upper and middle reaches of the Yangtze River where is suffering from severe soil erosion are systemically studied based on field experiments in 37 counties with double-ring method. Results show that the fitting precisions with Jiang Ding-sheng formula and Horton Equation are much higher than that with Philip and Kostiaikov Equation. Steady-state infiltration rate decreases with increased soil bulk density, but increases with increased total porosity, water stable aggregates, soil humus, and the ratio of silt to clay. Infiltration rates change significantly with soil type due to different soil characteristics. Steady-state infiltration rate varies regularly in different regions. This implies that changes in steady-state infiltration rates in Sichuan basin and Bijie region are the most rapid; in South Shaanxi, South Gansu, and the Danjiangkou Reservoir area, secondary; and in the lower reaches of Jinsha River and the red soil hilly region of South Jiangxi and East Hu'nan, the lowest. The regional differentiation matches with the major sediment source areas in the middle and upper reaches of the Yangtze River.

Keywords: middle and upper reaches of the Yangtze River; infiltration; steady-state infiltration rate

土壤入渗性能与土壤侵蚀有着紧密的联系, 是土壤抗侵蚀体的内在因素之一, 也是研究地表径流和坡面侵蚀的起点, 探讨流域产流机制的基础与前提。因此, 对土壤因子重要研究内容之一的土壤入渗性能进行深入研究, 对认识区域产汇流问题有重要意义。目前, 国内学者尽管就入渗问题进行了许多研究, 但多集中于黄土高原区^[1-6]; 对于基础研究比较薄弱的长江中上游地区, 仅限于一些热点地区如干热河谷区和三峡库区^[7-10]等, 对大范围内的研究仍较少。

众所周知, 长江流域尤其是中上游地区水土流失严重。据我国首份《长江流域水土保持公报》, 长江流域水力侵蚀为众多水土流失类型中最为普遍的一种, 面积达 $5.70 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占水土流失总面积的 91.6%^[11], 并集中分布在中上游地区。据统计, 长江中上游地区坡耕地面积近 $1.0 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中 $> 25^\circ$ 的坡耕地 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年均土壤侵蚀总量达 $9.0 \times 10^8 \text{ t}$, 是坡面流失之最。长江流域严重的水土流失不仅造成表土丧失, 土壤肥力下降, 甚至母质、基岩裸

露,恶化了当地农业生态环境,而且造成长江中游江河湖泊泥沙淤积,更加剧了流域内泥石流、滑坡、洪涝等自然灾害的发生频率。

本文利用野外原位试验和室内分析相结合的方法,选择长江中上游地区的云南、贵州、四川、甘肃、陕西、重庆、湖北、湖南、江西等 9 个省(市)境内的 37 个县(市)的典型坡耕地,进行土壤双环入渗测试,从土壤因子的角度分析长江中上游地区土壤入渗性能及其区域分异特征,对不同类型土壤入渗性能及其影响因素进行探讨,以期对区域尺度的土壤侵蚀问题的深入开展提供径流基础,进而为该区域不同程度侵蚀区水土保持分区治理和生态环境建设提供科学理论依据。

1 研究方法

1.1 原位测试点选择

根据目前长江中上游地区土壤侵蚀产沙状况的不同,在金沙江下游及毕节地区、陕南及陇南地区、嘉陵江中下游、三峡库区以及湘江资水中游地区和赣江中下游地区等“长治”工程重点防治区中选择了 37 个测点。由于长江流域地域辽阔,自然状况千差万别,土壤类型众多,为了全面合理反映其土壤入渗速率空间变化,测点选择要尽可能包含长江中上游地区的主要土壤类型,同时必须能充分反映出水土流失的区域性特征。

本文以丘陵和低山地区坡度在 5° 左右的坡耕地为测试对象,要求是残积环境、缓坡部位、侵蚀环境为受到较大的人为扰动并未受到明显侵蚀的地点,测试土壤的入渗性能,以便进行大范围内的对比和分析。选择的土壤类型主要包括黄壤、红壤、紫色土、石灰土、褐土和棕壤等,其中黄壤类测点 9 个,红壤类测点 6 个,紫色土类测点 11 个,石灰土类测点 6 个,其它土类测点 5 个。

1.2 土壤入渗性能以及理化性质测定

为了对比分析土壤因子对入渗性能的影响,采用双环法测定土壤的入渗性能^[12],内环直径为 35.5 cm,高 25 cm,外环直径为 50.5 cm。试验统一历时 80 min,以 80 min 时的入渗速率作为土壤的稳渗速率,在同一地块重复测试 2 次,结果取平均值。入渗试验的同时,在测试点附近采集表层 0—10 cm 的土样,用作室内土壤理化性质的测定和分析。土壤表层容重测定采用环刀法,比重测定采用比重瓶法,用公式:总孔隙度(%) = (1 - 容重/比重) × 100 来计算土壤的总孔隙度,颗粒分析采用甲种比重计法测定^[13];有机质含量测定采用重铬酸钾氧化—外加加热法^[14],土壤水稳性团聚体含量测定采用改进的约得(Yoder)法^[14]。

2 结果与分析

2.1 土壤入渗过程拟合

土壤水分入渗的数学模型有许多种,如 Green—Ampt 方程、Philip 方程、Kostiakov 经验公式、Horton 公式、方正三通用经验公式以及蒋定生经验公式等,其使用条件各异。本文通过对常用入渗公式进行分析,结合前人的研究成果,选取概念较为明确,使用较为可靠的 Philip 方程、Kostiakov 经验公式、Horton 公式和蒋定生经验公式对入渗数据较为完整和可靠的 17 组试验过程进行拟合,结果见表 1。

比较 4 种入渗模型的相关系数(R^2)可以看出,在长江中上游地区,利用蒋定生公式和 Horton 公式进行拟合的精度高于 Philip 方程和 Kostiakov 经验公式,其相关系数均值分别为 0.94, 0.93, 0.89 和 0.85。这与王经民等对陕北黄土高原土壤入渗模型的研究结果^[15]是一致的,说明蒋定生通过对黄土高原入渗试验总结的经验公式也适用于我国长江流域的土壤入渗模拟。从拟合结果可以看出,对于土壤稳渗速率的拟合,4 种模型结果比较一致,最大值均出现于遂宁;稳渗速率最小值结果有较大差异。这主要是公式使用条件差异所造成的。

为了明确上述 4 种入渗公式与实测入渗速率的拟合情况,分别用上述 4 种公式计算遂宁测点的入渗速率,并结合不同时间的实测入渗速率绘制入渗曲线。结果表明,在入渗初始阶段(1 min 内),Kostiakov 公式和 Horton 公式拟合较好。入渗衰减阶段(10 min 时),Horton 公式和蒋定生公式拟合结果都偏小。Kostiakov 公式拟合较好,在入渗稳定阶段(80 min),Kostiakov 公式与 Philip 方程与入渗实测曲线最为相似,其中 Kostiakov 曲线与入渗曲线最为接近。这与李亚娟等对甘肃南小河流域塬面苹果园和阴坡油松林的模拟结果是一致的^[16]。

2.2 土壤入渗速率影响因素

土壤的初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率是评价土壤水分入渗中最为常用的 3 个指标。土壤初始入渗速率和平均入渗速率均与土壤初始含水量相关。

一般而言,土壤初始入渗速率与初始含水量成反比,在初始含水量不同时,仅比较土壤初始入渗速率的大小意义不大。而稳渗速率主要与土壤自身物理、化学性质有关,当达到稳渗速率时,一般所测定的土壤含水量已饱和,消除了土壤含水量对入渗速率的影响。由于本次测试范围广,土壤初始含水量不易控制一致,因此,本文主要针对土壤稳渗速率进行分析。

根据土壤入渗速率影响因子的不同, 本文选取影响土壤入渗速率的容重、总孔隙度、有机质含量、粉/黏、> 0.25 mm 水稳性团聚体等因子, 对其与土壤稳

渗速率的关系进行相关分析(表 2)。可以看出, 容重、总孔隙度、> 0.25 mm 水稳性团聚体含量、有机质含量和粉/黏均和土壤稳渗速率显著相关。

表 1 4 种入渗模型中参数的回归结果

测点	Kostiakov 入渗公式			Horton 入渗公式				蒋定生公式				Philip 公式		
	$f(t) = at^{-b}$			$f = f_c + (f_1 - f_c)e^{-kt}$				$f = f_c + (f_1 - f_c)t^{-k}$				$f = f_c + 1/2st^{-1/2}$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>f_c</i>	<i>f₁</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>f_c</i>	<i>f₁</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
兴山	3.89	0.13	0.60	0.32	1.78	0.27	0.93	2.58	3.66	1.90	0.93	1.95	4.94	0.75
长寿	5.18	0.36	0.82	1.53	27.76	2.22	0.95	1.09	6.11	0.77	0.97	0.22	12.24	0.95
利川	6.64	0.51	0.97	1.40	27.13	2.04	0.97	0.46	6.73	0.64	0.99	-0.16	14.01	0.98
广安	3.79	0.32	0.82	1.37	8.25	0.74	0.89	0.90	4.26	0.66	0.90	0.51	7.65	0.89
遂宁	25.59	0.34	0.77	10.04	116.4	1.98	0.85	8.25	27.21	1.08	0.88	2.57	55.32	0.83
商南	11.33	0.38	0.96	3.46	23.13	0.69	0.94	1.94	12.14	0.64	0.98	0.91	22.86	0.97
宜宾	12.28	0.41	0.96	3.39	26.16	0.70	0.93	2.02	13.25	0.71	0.99	0.42	26.43	0.97
攀枝花	1.85	1.00	0.96	0.21	11.84	2.17	0.96	0.11	1.64	1.38	0.98	-0.54	5.32	0.86
昭通	5.78	0.29	0.66	2.32	20.47	1.22	0.95	2.05	6.90	1.11	0.97	0.59	14.46	0.87
元谋	1.91	0.90	0.85	0.16	15.71	1.60	0.99	0.04	2.89	1.34	1.00	-1.02	9.36	0.85
威宁	4.21	0.24	0.81	1.86	6.42	0.38	0.76	0.75	4.58	0.37	0.72	1.29	6.50	0.71
赫章	5.16	0.18	0.72	2.83	9.70	0.70	0.93	2.47	5.70	0.71	0.90	2.00	7.60	0.88
黔西	3.97	0.71	0.85	0.40	17.68	0.97	0.99	0.02	5.84	0.95	0.97	-1.41	15.61	0.90
邵阳	7.85	0.27	0.88	3.38	16.09	0.81	0.93	2.57	8.41	0.68	0.94	1.84	13.46	0.93
衡阳	12.32	0.57	0.96	2.27	26.75	0.73	0.89	0.91	12.61	0.74	0.97	-0.96	28.12	0.95
于都	4.09	0.60	0.95	0.88	37.87	2.82	0.93	0.69	3.79	1.55	0.95	-0.75	11.76	0.83
兴国	4.12	0.43	0.95	0.89	5.82	0.28	0.92	0.05	4.29	0.45	0.96	0.22	8.09	0.96

注: *R*² 为相关性系数; *f₁* 为土壤初渗速率; *f_d* 为土壤稳渗速率; *a, b, k, s* 为经验参数; *t* 为入渗时间(min)。

表 2 土壤稳渗速率与各影响因子的相关分析

项目	稳渗速率/ (mm · min ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	总孔隙度/ %	> 0.25 mm 水稳性 团聚体含量/%	有机质 含量/%	粉/黏
稳渗速率/(mm · min ⁻¹)	1.000					
容重/(g · cm ⁻³)	-0.717**	1.000				
总孔隙度/%	0.691**	-0.987**	1.000			
> 0.25 mm 水稳性团聚体含量/%	0.554**	-0.544**	0.592**	1.000		
有机质含量/%	0.538**	-0.370*	0.365*	0.544**	1.000	
粉/黏	0.533**	-0.436*	0.468**	0.129**	0.106	1.000

注: ** 表示 *p* < 0.01 水平具有显著相关; * 表示 *p* < 0.05 水平具有显著相关。

进入土壤中的水分是在土壤孔隙中运行的, 土壤孔隙的大小、分布以及连通状况与土壤渗水能力关系密切, 孔隙越多, 尤其是大的孔隙越多, 渗透率越大^[9]。本次测试用总孔隙度表示土壤的孔隙状况。

从表 2 可以看出, 土壤稳渗速率和土壤孔隙度呈极显著的正相关关系, 但是其相关性并不如容重与土壤稳渗速率之间的相关系数高, 这是因为土壤的通透性主要取决于孔径超过 0.02 mm(或 0.06 mm)的非毛管孔隙^[10], 总孔隙度只能说明土壤孔隙数量, 而不能

反映土壤孔隙大小和分配状况; 容重是土体密实程度和总孔隙度大小的综合反映, 容重越大, 土体越密实, 孔隙度越小, 渗水越慢。稳渗速率随着 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量的增多而增大, 这是因为团粒结构在土壤内形成大量的孔隙, 使土壤通气透水性得到改善; 稳渗速率和有机质含量呈正相关关系, 因为有机质除其本身疏松多孔能提高土壤的入渗性能外, 还是形成土壤团聚体的重要物质, 团聚体的大量形成也会间接促进土壤的稳定入渗性能; 稳渗速率与粉/黏成正相

关,粉/黏越小,土壤质地越黏重,颗粒间孔隙越小,越不易渗水。

2.3 不同类型土壤入渗速率

图 1 为 4 种类型土壤的稳渗速率,结果表明,黄壤系列土类稳渗速率最大,均值为 2.68 mm/min ,其次是石灰土和紫色土,均值分别为 2.16 mm/min 和 1.81 mm/min ,红壤类土壤稳渗速率最小,均值为 0.25 mm/min ,为黄壤系列土类的 $1/10$ 左右。土壤的稳渗速率之所以随土壤类型产生有规律的变化,是因为各土类的质地、结构以及土壤生物化学特征上存在较大差异。从图 2 可以看出,在 4 种土类中,黄壤类容重最小,质地最轻,土壤孔隙度最大,团粒和有机质含量也是最高,结构较好;石灰土团粒和有机质含量也较丰富,表层结构较好,但质地黏重;深受石灰性紫色岩石影响的紫色土,孔隙度较黄壤和石灰土小,表土有机质含量较低,而且团粒含量较少,质地较为黏重,结构较差;而取自于四川省南部县和江南丘陵区的红壤,不仅质地最为黏重,而且有机质和团粒含量都较低,结构较差,透水能力较差。

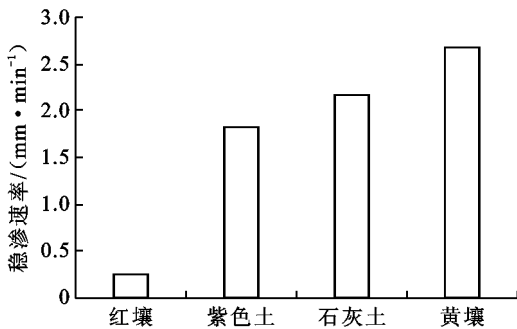


图 1 不同类型土壤稳渗速率比较

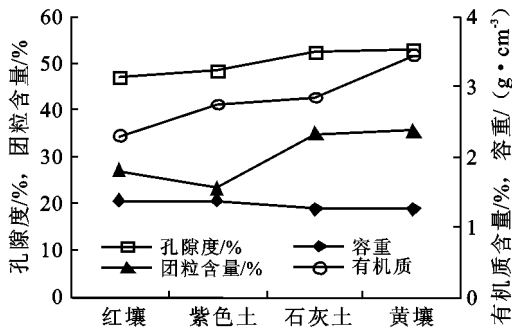


图 2 不同类型土壤的理化数据对比

2.4 长江中上游地区土壤入渗速率空间分异

由于土壤类型、质地、结构、肥力水平的不同,土壤稳渗速率在水平变化上,呈现出明显的地域差异性,根据土壤稳渗速率地域差异特征,结合一定的自然条件特点,初步将长江中上游地区按土壤入渗性能的强弱划分为 3 个区域:稳渗速率极高值区,稳渗速

率极高值区和稳渗速率一般区。稳渗速率极高值区主要包括四川盆地、毕节地区、川东、川西山地丘陵、云贵高原以及陕南局部地区,稳渗速率极高,达到 2.4 mm/min 以上,尤其是遂宁和自贡及其周围地区,稳渗速率达到 3.84 mm/min 以上,该区域土壤类型以黄壤、石灰土和紫色土为主,土壤颗粒较粗,入渗速率最快。稳渗速率高值区主要包括秦巴山地及东部余脉、南方红壤丘陵部分地区以及川西高山地区等,土壤稳渗速率在 $0.72 \sim 2.4 \text{ mm/min}$ 之间,此区新构造运动强烈,地貌结构复杂,坡陡沟深,除巴山多石灰岩外,其余广大地区一般为花岗岩、千枚岩、砂岩等,土壤土质差而浅薄,结构松散,石质含量高,土壤容重多在 1.2 g/cm^3 以下,黏粒含量较少,水稳性团聚体含量在 18% 左右,入渗速率不大。稳渗速率一般区主要包括金沙江下游地区和赣南红壤丘陵地区,土壤稳渗速率偏低,多在 0.72 mm/min 以下,该区土壤以红壤为主,土壤结构不良,质地黏重,透水性差,土壤入渗速率较小。

土壤稳渗速率的这种空间分异与长江流域目前的重点产沙区相对应,如稳渗速率一般区金沙江下游地区,是长江流域重点产沙区之一,赣南红壤丘陵区是崩岗侵蚀的高发区;陕南及陇南地区、四川盆地、三峡库区以及丹江口库区等稳渗速率高值区,是长江流域的几大重力侵蚀产沙区;而稳渗速率极高值区毕节地区是长江流域石漠化严重的地区之一,也是重点产沙区之一。

3 结论

通过对长江中上游地区 9 个省(市)境内的 37 个县(市)土壤入渗双环测试,分析了长江中上游地区土壤入渗性能特征及其区域分异特征。

(1) 蒋定生经验公式适用于我国长江流域的土壤入渗过程模拟。

(2) 影响长江中上游地区土壤稳渗速率的土壤属性主要有容重、孔隙度、 $> 0.25 \text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量、有机质含量以及粉/黏,稳渗速率和容重呈负相关,与孔隙度、 $> 0.25 \text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量、有机质含量以及粉/黏呈正相关关系。

(3) 在长江中上游地区,土壤稳渗速率大小随土壤类型的变化是:黄壤系列土类入渗速率最大,然后是石灰土、紫色土系列土类,红壤系列土类最小。

(4) 长江中上游流域土壤稳渗速率呈现出有规律的区域变异,四川盆地、毕节地区、川东、川西山地丘陵、云贵高原以及陕南局部地区是稳渗速率极高值区,达到 2.4 mm/min 以上,秦巴山地及东部余脉、南方红壤丘陵部分地区以及川西高山地区是稳渗速率

高值区, 稳渗速率在 0.72~2.4 mm/min 之间, 金沙江下游地区和赣南红壤丘陵地区是稳渗速率一般区, 稳渗速率多在 0.72 mm/min 以下。土壤稳渗速率的这种空间分异与长江流域目前的重点产沙区相对应。

[参 考 文 献]

- [1] 勃海锋, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 1—5.
- [2] 张瑶, 张科利, 罗利芳, 等. 黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J]. 泥沙研究, 2005(5): 45—50.
- [3] 董三孝. 黄土丘陵区退耕坡地植被自然恢复过程及其对土壤入渗的影响[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 1—5.
- [4] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(05): 18—24.
- [5] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579—583.
- [6] 袁建平, 雷廷武, 郭素彦等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异性[J]. 水利学报, 2001(10): 88—92.
- [7] 张平仓, 郭熙灵, 刘晓路. 关于长江中上游水土流失基本问题探讨[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5): 99—104.

- [8] 周维, 张建辉. 金沙江支流冲沟侵蚀区四种土地利用方式下土壤入渗特征研究[J]. 土壤, 2006, 38(3): 333—337.
- [9] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2003(1): 16—20.
- [10] 张平仓, 杨勤科, 夏艳华. 长江中上游地区土壤侵蚀机制及过程试验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(4): 376—380.
- [11] 长江水利委员会. 长江流域水土保持公报[OL]. <http://www.cnsccm.org/gzdt/200711151610433b85e4.aspx>, 200801.
- [12] 张爱国, 张平仓. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1—7.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 王经民, 吴钦孝, 韩冰, 等. 陕北黄土区土壤入渗模型比较探讨[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(4): 288—290.
- [16] 李亚娟, 宋孝玉, 李怀有, 等. 甘肃西峰南小河流域土壤入渗分布规律研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(12): 147—151.

欢迎订阅 2009 年《水土保持研究》

《水土保持研究》创刊于 1985 年, 双月刊, 中文版, 属地球科学类期刊。主管单位为中国科学院, 由中国科学院水利部水土保持研究所主办。为《中国科技论文统计源期刊》、《中国科学引文数据库统计源期刊》、《中文核心期刊要目总览》。本刊为 A4 开本, 272 页/期。刊号为: ISSN1005-3409, CN61-1272/P。国内邮发代号: 52-211, 定价: 20.0 元/册。报道内容: 土壤侵蚀、旱涝、滑坡、泥石流、风蚀等水土流失灾害的现状与发展动态; 水土流失规律研究、监测预报技术研发成就与监测预报结果; 水土流失治理措施与效益分析; 水土流失地区生态环境建设与社会经济可持续发展研究; 计算机、遥感工程、生物工程等边缘学科新技术、新理论、新方法在水土保持科研及其实践中的应用; 国外水土流失现状及水土保持研究新动态等。读者对象: 从事水保科技研究、教学与推广的科教工作者及有关行政管理人员; 国内外环境科学、地学、农业、林业、水利等相关学科的科教人员及大专院校师生。

地址: 陕西省杨凌区西农路 26 号《水土保持研究》编辑部

邮编: 712100

电话: (029) 87012705

E-mail: research @ ms. isw. c. ac. cn

<http://www.isw.c.ac.cn>