

# 真空预压技术加固软土地基的现场试验研究

宋雪琳<sup>1,2</sup>, 齐剑峰<sup>1,2</sup>, 李铎<sup>1,2</sup>, 解咏平<sup>1</sup>

(1. 石家庄经济学院 工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 结合上海某机场跑道真空预压加固软基的试验成果, 对加固试验区的地表沉降及其估算方法, 不同深度处的超孔隙水压力消散和加固效果等方面进行了研究。结果表明, 加固区土体沉降从大到小依次为场地中央、场地边缘和场地角落, 反映出真空预压的空间效应; 当真空度发生变化时, 加固区竖向排水体负压沿深度的分布基本一致, 负压范围集中在 58~65 kPa, 约占膜下真空度的 68%~76%; 该地表面沉降能够联合竖向等效渗透系数、一维太沙基固结理论和分层总和法进行估算。

**关键词:** 真空预压; 软基; 现场试验; 地表沉降; 孔隙水压力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)04-0011-05

中图分类号: S330.3

## A Field Study of Reinforcing Soft Foundation by Vacuum Preloading Method

SONG Xue-lin<sup>1,2</sup>, QI Jian-feng<sup>1,2</sup>, LI Duo<sup>1,2</sup>, XIE Yong-ping<sup>1</sup>

(1. School of Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 2. The Open and Key Laboratory of Sustainable Development and Utilization of Water Resources, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

**Abstract:** Through studying the experimental results on reinforcing soft foundation by vacuum preloading on an airdrome runway in Shanghai City, surface settlement and its calculation method, dissipation of excessive pore water pressure, and reinforcing effects on test zone are discussed. The testing data indicate that the settlement in test zone, from large to small, is observed in center, margin, and corner of site and this reflects the effects of vacuum preloading method. When vacuum degree changes, the distribution of suction pressure with depth in drained body of test zone is almost equal. The range of suction pressure is 58~65 kPa, i. e., 68%~76% of vacuum degree under seal membrane. Furthermore, the analysis show that the estimation of surface settlement of soft foundation may be carried out through combining vertical equivalent penetration coefficient, Terzaghi's one dimensional-consolidation theory, and layerwise summation method.

**Keywords:** vacuum preloading; soft foundation; field test; surface settlement; pore water pressure

我国东南沿海地区软土分布广泛。由于沉积环境、组成成分及天然固结状态等条件的不同, 这种软土物理力学性质表现为强度低、渗透性差和压缩性高且具有明显的流变性、触变性等特点。若未经处理, 这种软土地基沉降稳定历时一般需要几年、几十年, 甚至更长的时间<sup>[1]</sup>。在此类地基上修建机场跑道, 不仅要求地基稳定, 而且对工后沉降还有较高的要求。软土地基的过大工后沉降, 将会影响机场跑道的正常使用功能。对于软弱地基的处理, 目前主要采用堆载预压和复合地基或桩基础。

尽管传统的堆载预压法造价低, 但工期长且工后沉降大, 而桩基础则造价高。真空预压法处理软弱地基以其经济节省、质量可控制等优势, 近年来在港口与航运工程中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。真空预压法最早由

Kjellman 提出, 后来我国经过大量试验研究和实际工程应用, 取得了一定的施工经验与理论计算依据<sup>[3]</sup>。真空预压法是将需要加固地基的表面铺设土工薄膜, 再将膜下抽真空形成负压, 通过负压沿竖向排水通道向下传递, 使土体中孔隙水渗流到排水通道中, 从而达到土体排水固结和地基加固的目的。

上海某机场跑道地基为软弱地基, 浅部含有 8 m 左右的粉砂层, 下部的软土最大厚度为 12.0 m。由于传统的处理方法对地基沉降控制不足, 该工程地基拟采用真空预压法处理, 并对工程的部分路段加固效果进行了试验研究。本研究通过对试验段地基处理实测数据的对比分析, 对加固试验区的孔隙水压力发展与地表沉降及其计算分析方法进行了探讨, 并简要介绍了真空预压法的施工工艺和加固边界密封的深

层搅拌桩墙技术,为类似地基的真空预压法施工提供借鉴。

## 1 工程概况及其地质条件

建筑场地位于长江三角洲冲积平原,地貌形态单一。场地浅部地下水为潜水类型,水位随季节而变化,其静止水位埋深在 0.8~2.0 m 之间。在 35 m 深度范围内,地基土均属第四纪河口—滨海相、河口—湖沼相和浅海相沉积,试验段地基划分为 6 个工程地质地层,各地层土的物理力学性质指标详见表 1。

试验段场地真空预压处理面积为 9 872 m<sup>2</sup>,处理深度均为 20 m,砂砾石垫层为 0.5 m,排水板布置为等边三角形,主要处理软弱的第 1 工程地质地层。

根据排水板间距不同将处理区分为 Z<sub>1</sub> 和 Z<sub>2</sub> 两个试验区,排水板间距分别为 1.5 与 1.2 m,用以研究排水板间距对地基表面沉降和加固效果的影响。加固区共布置 12 台功率为 7.5 kW 真空泵,有效抽

真空历时 90 d,加固区累计最大沉降为 291 mm。边界密封是对加固区四周进行有效封堵,通过边界密封达到提高试验区膜下真空度的目的。目前常用的密封措施有密封沟、水泥石搅拌桩墙和垂直侧向铺塑等几种。由于试验区地基表层存在透水的粉土层、粉砂层,因而边界密封采用在地基四周进行密封帷幕处理,以切断透水透气层。

试验区边界密封墙采用水泥石搅拌桩(图 1),水泥石搅拌桩直径 700 mm,桩间距 500 mm,彼此搭接 200 mm 形成水泥石桩墙。搅拌桩长度控制以穿透表层粉砂透水层进入其下不透水层 0.50 m 为准。水泥石搅拌桩采用 6%、8% 和 10% 共 3 种水泥掺量,通过原位注水试验,得到成桩一周后各掺量搅拌桩渗透系数分别为  $1.8 \times 10^{-8}$ 、 $1.4 \times 10^{-8}$  与  $6.1 \times 10^{-9}$  m/s,因而密封墙具有良好的抗渗能力和持久的气密性。试验加固区内水位降深不超过 10 m,根据粉砂层厚度将水泥石搅拌桩墙深度设定为 10 m。

表 1 土层物理力学性质指标

层序	地层名称	层厚/ m	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	比重	含水量/ %	内聚力/ kPa	内摩 擦角/(°)	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	
								k <sub>h</sub>	k <sub>v</sub>
	填土	0.7	—	—	—	—	—	—	—
	褐黄色粉质黏土	1.1	18.6	2.74	36.9	17.0	20.0	$2.2 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$
	灰色粉砂	7.6	18.1	2.72	39.1	8.8	18.0	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-6}$
	灰色淤泥质黏土	9.4	17.1	2.75	50.3	13.0	10.5	$1.4 \times 10^{-7}$	$8.2 \times 10^{-8}$
1	灰色黏土	10.2	18.2	2.73	37.7	14.0	11.5	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-7}$
2	灰色粉质黏土	5.1~未穿	18.4	2.72	33.5	11.4	23.5	$2.6 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-7}$

## 2 现场测试方案布置及施工工序

现场试验测试元件包括沉降标、真空度测头、孔压计和水位管,测试元件埋设平面布置如图 1 所示。由图中可见,加固 Z<sub>1</sub> 和 Z<sub>2</sub> 区分别埋设 20 个沉降标,在每个区分 4 行呈近似平行分布,以便监测加固区各处地表沉降量。真空度测头布置在膜下,Z<sub>1</sub> 和 Z<sub>2</sub> 区分别为 6 个与 8 个。本次试验在各地层中共布置 4 组孔压计,每组钻孔 2 个,孔内沿垂直方向每隔约 2 m 埋设 4 个孔压计,用以测试各个真空预压阶段的淤泥质粘土层的孔隙水压力变化。

试验区真空预压的基本施工工序为:(1) 砂垫层铺设前准备。主要包括场地平整、测量放样、砾料和施工机具进场等准备工作。(2) 砂垫层施工。主要包括砾石、砂的运送到位和按设计铺设厚度铺平。(3) 排水板施工。考虑到试验区浅部存在 7~9 m 厚粉砂层,插板难度较大,施工时选用 4.0 t 履带式振动插板机。采用振动沉管法插入排水板,沉管过程中

注意测桩管的垂直度,导管拔出时剪断排水板,使其露出砂垫层 0.5 m。(4) 水泥搅拌桩施工。包括开挖、定位、水泥浆制备、水泥石搅拌成桩等工序,采用 4 台 SJB-2 型深层搅拌机成桩。(5) 真空预压施工工序,包括开挖密封沟、埋设滤水管、铺设密封膜和抽真空等,其中滤水管间距为 5.0 m,直径为 55 mm,外部用土工布包裹,以防止堵塞滤眼。在埋设真空表测头等观测仪器后,先铺设一层彩条布,然后分层铺设两层密封薄膜,并将薄膜周边埋入密封沟。

## 3 试验结果与分析

对于浅部含有较厚粉砂层的软弱地基,采用真空预压法处理的研究资料较为少见,因此有必要在施工过程中进行动态观测和试验研究,及时指导现场施工和对真空预压加固软基的力学性状进行研究,为该工法在类似地质条件的应用积累经验。

### 3.1 地表沉降及其计算分析

在 Z<sub>1</sub> 与 Z<sub>2</sub> 两个区内,由真空探头测得的真空度

随时间的变化如图 2 所示。由图中可见,在抽真空开始的 6 d 内,真空度一直徘徊在 65 kPa 左右,主要由于膜内残留气体排出所致,后去除停电、破膜修补等造成真空度降低的时间,其余时间真空度一直保持在 80 kPa 以上。

该机场跑道地基真空预压处理历时 113 d,有效加载时间为 90 d,有效加载的真空度均达到 80 kPa 以上。真空预压试验结束的标准为连续 5 d 沉降速率低于 1.5 mm/d。

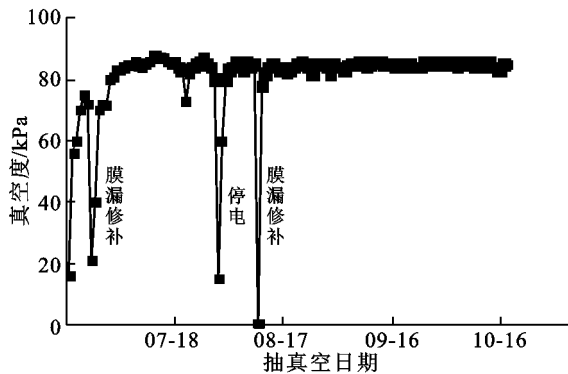


图 2 真空度随时间变化

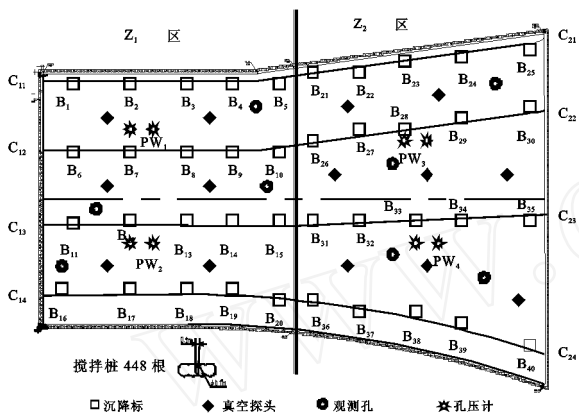


图 1 真空预压监测平面布置

由图中可见,在真空预压的前期,各个位置处的沉降速率相对较大,随着抽真空时间的增加沉降速率逐渐减小,然而各处的最终地表沉降不同,沿密封帷幕的 C<sub>11</sub> 线沉降约为 150 mm,在 C<sub>14</sub> 线附近沉降约为 170 mm,中部的 C<sub>12</sub> 和 C<sub>13</sub> 线沉降量较大,约为 260 mm。即试验区域的中央部位沉降最大,试验区边缘次之,试验区四周及边角部位沉降量最小,反映出真空预压的空间效应。Z<sub>2</sub> 区的真空预压沉降变化曲线模式与 Z<sub>1</sub> 区基本相似,所不同的是场地中部最终沉降量与沉降速率较大,分析其原因主要是排水板间距小于 Z<sub>1</sub> 区,可见排水板间距的大小对最终沉降量与沉降速率都有一定的影响。抽真空结束时各处沉降速率满足连续 5 d 沉降速率低于 1.5 mm/d 的标准。抽真空结束后场地表面出现一定的反弹,反弹值在 1~4 mm 之间,总体反弹不明显。

3.1.1 地表沉降 受密封帷幕、地层地质条件等因素的影响,Z<sub>1</sub> 区与 Z<sub>2</sub> 区不同位置处真空预压造成的地表沉降量有一定的差异和规律。位于 C<sub>11</sub>, C<sub>12</sub>, C<sub>13</sub> 与 C<sub>14</sub> 线上的不同位置处地表沉降如图 3 所示。

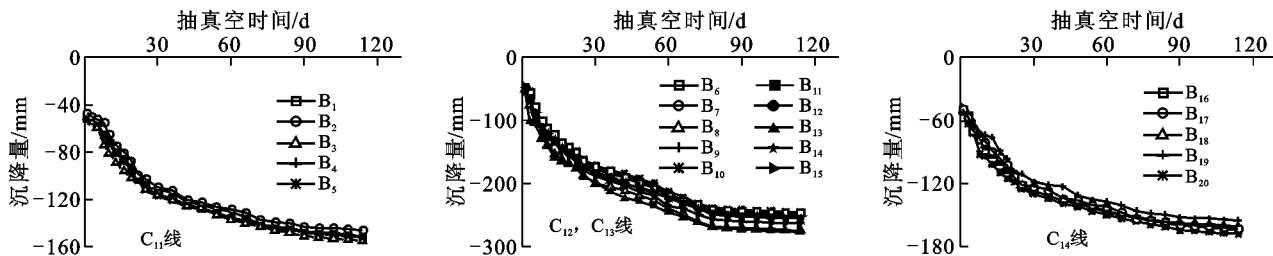


图 3 Z<sub>1</sub> 区不同位置的沉降变化

3.1.2 地表沉降的计算分析 从宏观角度来看,通过打设排水板加固软土地基,排水板的主要作用是通过缩短土体间的排水距离达到加速固结的目的。理论上增加土体的渗透系数同样可以达到加速固结的目的。因而,利用固结度等效的原则得到等效竖向渗透系数,从而将排水板加固地基简化为渗透系数较大的天然层状地基进行计算分析<sup>[4]</sup>。从这种研究思路出发,彭劫<sup>[5]</sup>通过分析得到单层砂井(排水板)地基的等效渗透系数为

$$k_v = (1 + 2.67 \frac{H^2 k_h}{D_e^2 \mu k_v}) k_v \quad (1)$$

对于多层砂井地基各层的等效竖向渗透系数可简化为

$$k_{vn} = (1 + 2.67 \frac{l^2 k_{ln}}{D_e^2 \mu k_{vn}}) k_{vn} \quad (2)$$

式中:  $k_v, k_{vn}$  ——分别为单层和第  $n$  层竖向等效渗透系数;  $H, l$  ——分别为土层厚度和排水板长度;  $k_h, k_v$  ——分别为地层水平和竖向渗透系数;  $D_e$  ——单井影响区直径,根据上海地区软土使用经验  $D_e$  可按照下式计算

$$D_e = 2 \times 1.95 S \sqrt{H_w K_{ch}} \quad (3)$$

式中:  $H_w, S$  ——分别为含水层厚度和水位降深 (m);

$K_{ch}$  ——成层水平等效渗透系数 (m/d)。μ 值可按下列算式计算:

当同时考虑涂抹和井阻影响时

$$\mu = \ln\left(\frac{D_c}{d_s}\right) + \frac{k_h}{k_v} \ln\left(\frac{d_w}{d_s}\right) - \frac{3}{4} + \frac{2l^2 k_h}{3q_w} \quad (4a)$$

仅考虑涂抹影响时

$$\mu = \ln\left(\frac{D_c}{d_s}\right) + \frac{k_h}{k_v} \ln\left(\frac{d_w}{d_s}\right) - \frac{3}{4} \quad (4b)$$

当涂抹和井阻影响均忽略

$$\mu = \ln\left(\frac{D_c}{d_s}\right) - \frac{3}{4} \quad (4c)$$

式中:  $d_w, d_s$  ——分别为井径和涂抹区直径;  $q_w$  ——排水板通水能力。当等效渗透系数确定以后,真空预压加固区土体就可以按照工程中常用的一维太沙基固结理论与分层总和法计算任意时刻的土体沉降<sup>[5]</sup>。

根据加固区的实际工程地质条件进行简化,主要计算地下水位以下第 和 层地基产生的沉降,计算厚度分别取  $H_1 = 8$  m 和  $H_2 = 10$  m。计算不考虑井阻和涂抹的影响时,由表 1 测得的物理性质指标及式 (1) —(4) 计算得到第 和 层地基等效渗透系数  $k_{v3} = 2.45 \times 10^{-7}$  m/s 与  $k_{v4} = 2.74 \times 10^{-8}$  m/s,初始孔隙比分别为  $e_{03} = 1.01$  和  $e_{04} = 1.38$ 。参考上海地质矿产日志<sup>[6]</sup>,取这两层的压缩系数分别为  $a_3 = 0.31$  和  $a_4 = 0.55$  MPa<sup>-1</sup>。由太沙基一维固结理论<sup>[7]</sup>,按式(5)求得两层土的竖向等效固结系数

$$C_{v3} = \frac{k_{v3}(1+e_{03})}{w a_3} \quad (5a)$$

$$C_{v4} = \frac{k_{v4}(1+e_{04})}{w a_4} \quad (5b)$$

进而由下式分别计算两层地基土的平均固结度

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{2} \exp\left(-\frac{2}{4} T_v\right) \quad (6)$$

式中:  $T_v$  ——竖向固结时间因数,  $T_v = C_v t / H^2$ 。由于现场试验的荷载面积远大于压缩土层的厚度,因而土层附加应力沿深度是均布的,大小等于抽真空施加的压力,即:  $\sigma_z = P_0 = 80$  kPa。两层地基土的最终变形量可用下式计算

$$s = s_1 + s_2 = \frac{\sigma_z}{E_{s1}} H_1 + \frac{\sigma_z}{E_{s2}} H_2 \quad (7)$$

式中:  $E_{s1} = (1 + e_{01}) / a_3$ ,  $E_{s2} = (1 + e_{04}) / a_4$ 。通过计算地基最终变形量,与  $Z_1$  加固区中部实测的最终沉降较为一致。地基固结过程中任意时刻的变形量可用下式计算

$$s_1 = \bar{U}_z s \quad (8)$$

因此根据式(1) —(8)可以计算得到沉降随时间的变化曲线。考虑到试验加固区的沉降受边界影响,

将加固区中部的实测的沉降曲线(由 B8 沉降标测量得到)与计算得到的沉降曲线进行比较,如图 4 所示。由图可见,与实测结果相比,在抽真空初期计算值偏大,主要由于实际抽真空时真空度未达到 80 kPa,而计算时采用的仍是 80 kPa,总体上计算与实测结果较为吻合。计算表明第 层地基土由于等效渗透系数较大,在抽吸 10 d 就完成固结,总沉降量为 98.7 mm,而第 层地基土抽真空 90 d 的最终固结度为 92%。需要指出,加固区沉降计算没有考虑排水板间距的影响,计算采用了与单个排水板等效的成层均质地基的等效渗透系数,本研究将结合实际工程,考虑排水板间距对等效渗透系数的影响做进一步研究。

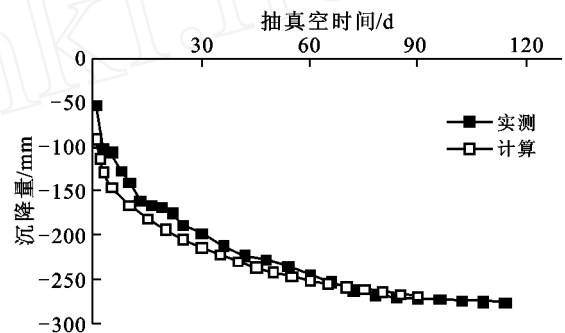


图 4 实测与计算所得的沉降变化对比

### 3.2 孔隙水压力变化

观测孔隙水压力的主要目的是监测软土地基中超孔隙水压力的消散情况和判断软土地基的固结状态。该加固试验区不同深度处的超孔隙水压力随抽真空时间的变化特点为浅层土层受真空作用显著,当真空度发生变化时,浅层土的超孔隙水压力升、降速度变化较快,而深层土反应缓慢,甚至影响甚微。

在真空预压加固地基中,通常采用真空度描述气体的压力状态,而采用负压描述液体的压力状态。在理论上确定加固区竖向排水体中的负压较为困难,但可以通过工程实测孔压资料反分析排水体中的负压分布。由孔压资料推算得到的最终孔压消散值减去地下水位下降引起的孔压消散值,进而可以得到竖向排水体负压分布<sup>[8]</sup>。该加固试验区的竖向排水体负压分布情况特点为:在打设排水板的 20 m 深度以内,竖向排水体负压沿深度的分布基本一致,其范围集中在 58 ~ 65 kPa,约占膜下真空度的 68% ~ 76%,某些部位超过了 85%。

### 3.3 加固效果

针对加固区第 层地基土,通过室内试验对真空预压加固前后的物理力学性质指标进行了对比分析。试验表明加固后淤泥质黏土的含水量为 35.2%,比

加固前减少了 15.1%;加固后孔隙比为 0.97,比加固前减少了 0.41;直剪和三轴剪切试验表明加固后抗剪强度有较大幅度的提高,且整个加固区范围内第层地基土的强度大小接近。

#### 4 结语

(1) 采用真空预压法能够加固浅部含有较厚粉砂层的软弱地基。有效抽吸 90 d 后,软弱地基的固结度达到 85%以上,能够较好满足设计要求。

(2) 加固区土体沉降量从大到小依次为:场地中央区域、场地边缘和场地角落,反映出真空预压的空间效应。

(3) 利用真空预压法加固多层软弱地基,当地基内部打设竖向排水板时,地基的沉降量能够采用等效竖向渗透系数、一维太沙基固结理论和分层总和法进行联合简化计算。

(4) 孔隙水压力测试结果表明,当真空度发生变化时,浅层土的超孔隙水压力升、降速度变化较快,而深层土反应缓慢,甚至影响甚微。在打设排水板 20 m 深度以内,加固区竖向排水体负压沿深度的分布基本一致,负压范围集中在 58~65 kPa,约占膜下真空度的 68%~76%。

致谢:感谢上海市地矿建设有限责任公司乔建敏高级工程师、张云达高级工程师在论文完成中给予的支持和帮助!

#### [参 考 文 献]

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [2] 任志福. 真空预压法软基加固密封技术及应用[J]. 工程勘察,2007(8):19-23.
- [3] 叶伯荣. 综述真空预压法在我国的发展[J]. 地基处理,2000(3):49-57.
- [4] 尚世佐,丁桂清,叶伯荣,等. 真空预压法加固软土地基在工民建中的应用[C]// 第三届塑料排水板加固软基技术研讨会论文集. 1版. 南京:河海大学出版社,1996.
- [5] 彭劫. 真空-堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [6] 上海市地方志办公室. 上海地质特征[OL]. [2008-11-01]. <http://www.shtong.gov.cn/node2/node2245/node4502/node55350/node55400/node55408/userobject1ai41568.html>.
- [7] 东南大学,浙江大学,湖南大学,苏州科技学院. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [8] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.

## 欢迎订阅 2010 年《水土保持通报》

《水土保持通报》创刊于 1981 年,双月刊,中文版,属环境科学类期刊,连续 5 届被认定为我国中文核心期刊。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与水利部水土保持监测中心联合主办。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》,以及日本《科学技术文献速报(J ICST)》,《中国期刊精品荟萃》等收编。本刊为 A4 开本,216 页/期。刊号为:ISSN 1000-288, CN 61-1094/X。国内邮发代号:52-167,国外发行代号:4721BM,定价:20.0 元/册。

办刊宗旨:紧密跟踪水土保持学科的发展动向,及时报道本学科前沿领域科学理论、技术创新及其实践应用研究最新成果,积极引导和推动水土保持学科和水土保持实践的发展与繁荣。

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:从事水土保持科学技术研究、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、水利等相关学科科教人员及大专院校师生。

地址:陕西省杨凌区西农路 26 号 中国科学院水利部水土保持研究所《水土保持通报》编辑部

邮编:712100

电话:(029)87018442

E-mail:bulletin@ms.iswc.ac.cn

http://www.iswc.ac.cn