坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程*

郑粉莉[1,2]　高学田[2]
(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌　712100)
(2 西北农林科技大学, 陕西杨凌　712100)

UP-SLOPE RUNOFF AND SEDIMENT AND DOWN-SLOPE EROSION-TRANSPORT-DEPOSITION PROCESSES

Zheng Fenli[1,2]　Gao Xuetian[2]
(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi　712100, China)
(2 Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi　712100, China)

关键词　汇流汇沙; 侵蚀过程; 地表面条件; 细沟侵蚀; 双径流土槽
中图分类号　S157　　文献标识码　A

侵蚀、搬运和沉积过程是土壤侵蚀过程中相互影响又相互制约的三个子过程。自从 20 世纪 40 年代 Ellison[1~4] 将水蚀过程分为四个子过程, 即雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程和径流搬运过程以来, 许多学者从不同角度对其进行了研究。Meyer 和 Wischeier[5] 及 Meyer 和 Foster[6] 基于 Ellison 的四个侵蚀过程, 提出了输沙量受侵蚀量和输沙能力的制约和细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主、细沟侵蚀以径流侵蚀为主的侵蚀概念模型。此模型即为美国新一代水蚀预报模型(WEPP) 的物理基础[7]。因为侵蚀、搬运和沉积过程在坡面侵蚀过程中每时每地连续发生, 因而存在着在一定的侵蚀条件下, 侵蚀—沉积占主导作用或侵蚀—搬运占主导作用或侵蚀—搬运—沉积皆占一定作用的侵蚀状况。但由于受研究手段的限制, 如何定量刻画坡面侵蚀、搬运、沉积过程的问题在我国至今没有得到解决。再者, 黄土高原梁峁坡面土壤侵蚀具有明显的片蚀—细沟侵蚀—浅沟侵蚀垂直分带性, 各垂直分带性是由水沙关系联系起来的一个侵蚀系统, 上方侵蚀带的汇流汇沙对下方侵蚀带的侵蚀—搬运—沉积过程产生重要的影响。因此, 本文通过双土槽(供沙土槽和试验土槽) 系统径流小区, 对黄土坡面的侵蚀、搬运、沉积过程及其坡上方汇流汇沙对坡下部侵蚀过程的影响进行定量研究, 为具有物理成因的水蚀预报模型建立提供物理基础。

1　试验设计和研究方法

1.1　试验设计

用于试验的双土槽系统由位于坡面下部的试验土槽和位于坡面上部的供沙土槽组成, 试验土槽长 3 m、宽 1.5 m, 供沙土槽长 2 m、宽 1.5 m, 二者通过连接装置进行连接, 使供沙土槽含沙水流输入到试验土槽中。当供沙土槽和试验土槽连接时, 供沙土槽的含沙水流经过削能槽均匀流入试验土槽, 模拟自然坡面汇流汇沙对坡下部侵蚀过程的影响。当上、下两个土槽分开时, 可以分别采集两个土槽的径流泥沙样。两个土槽的地面坡度皆为 20°。

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-422)、国家自然科学基金项目(40335050, 40071058)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目(10501-101)
作者简介: 郑粉莉(1960~), 女, 陕西蓝田人, 研究员, 博士生导师, 第十届全国人大代表, 主要从事土壤侵蚀过程及预报和土壤侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn
收稿日期: 2003-01-13; 收到修改稿日期: 2003-05-28

实验室的人工模拟降雨大厅进行。试验所用的人工降雨设备为侧喷式的人工降雨设备。降雨高度为 16 m, 可以满足所有的雨滴达到终点降落速度。试验选用两种降雨强度, 即 70 mm h^{-1}和 90 mm h^{-1}。试验用土为陕西省杨凌区的粘黄土母质, 填土深度为 40 cm。在试验过程中, 为了获取同一汇流强度下的多种含沙浓度, 用厚层塑料布将供沙土槽按不同的比例(0%、25%、50%、75%、100%) 进行覆盖, 形成在同一汇流强度条件下 5 个不同的含沙浓度, 研究坡面侵蚀、搬运和沉积过程及其坡上部汇流汇沙对坡下部侵蚀过程的影响。试验设计如表 1 所示。

表 **1**　人工降雨试验设计

处理编号	降雨强度 (mm h^{-1})	表面条件	土壤含水量[1)] (g g^{-1})	供沙土槽覆盖 (%)
1	70	干+ 翻耕	0. 191	0; 25; 50; 75; 100
2	70	湿+ 结皮	0. 275	0; 25; 50; 75; 100
3	70	湿+ 翻耕	0. 274	0; 25; 50; 75; 100
4	90	干+ 翻耕	0. 194	0; 25; 50; 75; 100
5	90	湿+ 翻耕	0. 274	0; 25; 50; 75; 100
6	90	湿+ 翻耕[2)]	0. 275	0; 25; 50; 75; 100

1) 土壤田间持水量为 25. 4%; 2) 试验处理 6 和试验处理 5 的降雨强度和下垫面条件均相同, 仅是供沙土槽在地面裸露时的供沙强度不同(见表 2)

1. 2　径流泥沙样的采集

试验开始时, 供沙土槽为无覆盖, 两个土槽为分开状态。当试验土槽产流后, 每分钟分别采集供沙土槽和试验土槽的径流泥沙样。当采集供沙土槽和试验土槽各 8 个径流泥沙样后, 用连接设备将两个土槽连接, 使供沙土槽的水流均匀汇入到试验土槽中。经过 1~ 2 min 试验土槽达到新的侵蚀平衡后, 每分钟采集试验土槽(试验土槽接受供沙土槽的汇流汇沙) 径流样, 采集 4 个径流样后, 又将两个土槽分开。经过 1~ 2 min坡面侵蚀平衡后, 分别采集供沙土槽和试验土槽的径流泥沙样各 2 个, 用于对比两个土槽连接前和连接后的侵蚀产沙变化。对于供沙土槽覆盖为 25%、50%、75% 和 100% 的处理, 径流泥沙样的采集与供沙土槽无覆盖处理时相同。一次试验过程取径流泥沙样 88 个, 试验历时约 75 min。

1. 3　资料分析方法

当两个土槽分开时, 同一试验处理供沙土槽和试验土槽的产流量分别为 Ru 和 Rd(L min^{-1}) , 当两个土槽连接时试验土槽接受供沙土槽汇流时的产流量为 Rud(L min^{-1}) , 有下面径流平衡关系:

$$Rud = Ru + Rd$$

又设两个土槽分开时, 同一试验处理供沙土槽和试验土槽的侵蚀产沙量分别为 Su 和 Sd (g min^{-1}) , 当两个土槽连接时试验土槽接受上方汇流时的侵蚀产沙量为 Sud(g min^{-1}) , 则 Sud 和 Su、Sd 之间有下列关系[8, 9]:

Sud< Su	坡面侵蚀和沉积同时发生, 沉积> 侵蚀;
Sud= Su	坡面侵蚀和沉积同时发生, 侵蚀= 沉积;
Sd< Sud< Su+ Sd	坡面侵蚀和沉积同时发生, 侵蚀> 沉积, 且坡上部汇流在坡下部引起了净侵蚀产沙量;
Sud= Sd+ Su	坡上方汇沙全部被径流搬运, 坡上方汇流在坡下部不引起净侵蚀产沙量;
Sud> Sd+ Su	坡上方汇沙全部被径流搬运, 坡上方汇流在坡下部引起净侵蚀产沙量。

此外, 利用下列关系式对坡上方汇沙的沉积或搬运状态和坡上方汇流引起坡下部的侵蚀产沙量进行定量分析。

A= Sud− Su, 为供沙土槽汇沙量在试验土槽发生的沉积(A 为负值) 或引起新的侵蚀(A 为正值) ;

B= Sud− (Su+ Sd) , 为供沙土槽汇流引起试验土槽的净侵蚀产沙量;

$C = \frac{Sud - (Su + Sd)}{Sud} \times 100\%$, 为供沙土槽汇流引起试验土槽的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量(Sud) 的比例。

2　结果和讨论

在试验条件下, 当供沙土槽和试验土槽分开时, 供沙土槽和试验土槽的径流量之和(Ru+ Rd) 与两个土槽连接时试验土槽的径流量(Rud) 基本相等, 表明在试验过程中, 坡面径流保持合理的平衡状态(表 2) 。而侵蚀产沙量的资料表明, 供沙土槽和试验土槽分开时二者的侵蚀产沙量之和(Su+ Sd) 小于或大于两个土槽连接时试验土槽的侵蚀产沙量(Sud) 。前一种情形属于 Sd< Sud< Su+ Sd 类型, 表明侵蚀与沉积在坡面同时发生, 但侵蚀大于沉积, 且坡上部汇流在坡下部引起了净侵蚀产沙量; 后一种情形属于 Sud> Su+ Sd 类型, 表明坡面不发生沉积, 侵蚀和搬运过程占主导地位, 同时坡上部汇流在坡

下方引起了净侵蚀产沙量(B), B值的大小受降雨强度、地表面条件和坡上方汇流含沙量的影响(表2)。

2.1 坡面侵蚀、搬运、沉积及坡上部汇流在坡下部引起的净侵蚀产沙量

试验结果表明(表2), 一次试验过程中供沙土槽汇流量保持不变而汇流强度小于170 g min^{-1}时, 试验土槽的汇沙量全部被径流搬运而不发生沉积, 坡面侵蚀现象为侵蚀—搬运过程占主导地位, 同时供沙土槽汇流在试验土槽引起了净侵蚀产沙量。而当供沙土槽汇流强度相同而汇沙强度大于200 g min^{-1}时, 坡面侵蚀、沉积同时发生, 且侵蚀>沉积, 坡面侵蚀现象为侵蚀—搬运—沉积过程皆占一定比例; 同时供沙土槽汇流在试验土槽也引起净侵蚀产沙量。此结果表明, 在坡面上方汇流一定时, 上方汇沙强度的增加可以改变坡下部的侵蚀过程。

表2 各次试验的产沙量和坡上部汇流引起坡下部的净侵蚀量和相对增沙量

处理编号	上方汇流含沙量	Su	Sd	Sud	A	B	上方单位汇流引起的净产沙量	C	侵蚀现象
1	15.7	48.0	112.5	203.3	155.3	42.8	13.8	21.1	侵蚀—搬运
	11.8	39.8	124.3	277.1	237.3	113.0	33.2	40.8	
	8.0	27.8	141.9	296.5	268.7	126.8	36.2	42.8	
	4.7	16.6	146.5	382.7	366.1	219.6	62.7	57.4	
	0	0	140.2	287.5	287.5	147.3	39.8	51.2	
2	10.2	33.3	166.8	383.3	350.0	183.2	55.5	47.8	侵蚀—搬运
	6.7	21.6	174.2	437.0	415.4	241.2	75.4	55.2	
	6.0	19.4	164.2	385.2	365.8	201.6	63.0	52.3	
	3.7	12.4	147.3	281.9	269.5	122.2	37.0	43.3	
	0	0	106.7	201.5	201.5	94.8	27.9	47.0	
3	23.4	72.5	119.6	307.6	235.1	115.5	37.3	37.5	侵蚀—搬运
	9.8	29.2	149.2	253.7	224.5	75.3	25.1	29.7	
	6.6	22.5	116.6	211.9	189.4	72.8	21.4	34.4	
	3.1	10.4	100.0	183.3	172.9	72.9	21.4	39.8	
	0	0	98.9	167.2	167.2	68.3	20.7	40.8	
4	16.3	64.8	230.9	485.0	420.2	189.3	47.3	39.0	侵蚀—搬运
	9.0	37.3	191.6	447.7	410.4	218.8	52.1	48.9	
	6.0	27.0	193.6	437.3	410.3	216.7	48.2	49.6	
	2.2	10.5	195.0	622.0	611.5	416.5	88.6	67.0	
	0	0	189.7	665.1	665.1	475.4	116.0	71.5	
5	39.5	169.1	413.7	687.5	518.4	104.7	24.3	15.2	侵蚀—搬运
	26.1	109.3	363.9	634.5	525.2	161.2	38.4	25.4	
	17.7	77.3	255.8	505.7	428.4	172.6	39.2	34.1	
	9.3	41.0	259.9	464.6	423.6	163.7	37.2	35.2	
	0	0	256.9	476.8	476.8	219.9	50.0	46.1	
6	48.5	208.1	487.0	683.9	475.8	-11.2	—	—	侵蚀—沉积
	23.8	104.7	311.1	568.9	464.2	153.1	34.8	26.9	侵蚀—搬运
	13.9	61.5	330.4	698.0	636.5	306.1	69.6	43.9	侵蚀—搬运
	8.1	37.7	550.7	1585.4	1547.7	997.0	226.6	62.9	侵蚀—搬运
	0	0	797.0	1519.3	1519.3	722.3	153.7	47.5	侵蚀—搬运

从表 2 还可以看出, 在降雨强度为 70 mm h^{-1}和土壤含水量小于 0.195 g g^{-1}时, 供沙土槽汇流引起试验土槽的净侵蚀产沙量 B 随着供沙土槽供沙强度的减小而增大。在降雨强度为 90 mm h^{-1}时, 无论土壤含水量如何变化, B 值皆随着供沙强度的减小而增大。造成此现象的原因是一次试验过程中, 一定的水流条件对应于一定的泥沙搬运能力, 在供沙土槽供沙量减少时, 水流必然在试验土槽引起另外的侵蚀产沙以使水流搬运泥沙量达到其搬运能力。因而随着供沙土槽汇流含沙量的减少, 其引起试验土槽的净侵蚀产沙量在增加。这一点在一定程度上支持了 Ellison[1~4] 的清水对土壤具有最大侵蚀分离能力的观点。

从上方汇流引起坡下部的净侵蚀产沙量占总侵蚀量的比例看(C 值) , 除地面有结皮处理的 C 值为一相对定值外, C 值皆随上方汇流含沙量的减小而增大。这一点与野外天然降雨侵蚀条件下的研究结论一致。

2.2　地表面条件对坡面侵蚀产沙的影响

试验结果表明, 在降雨强度为 90 mm h^{-1}时, Sd 和 Sud 皆随前期土壤含水量的增大而增加; 而在降雨强度为 70 mm h^{-1}和地面为翻耕裸露时, Sd 和 Sud 皆随前期土壤含水量的增大而减少。地表有结皮和没有结皮的试验结果表明, 在相同降雨和土壤含水量条件下, 有结皮时试验土槽的侵蚀产沙量 (Sd 和 Sud) 明显大于无结皮时对应的侵蚀产沙量。说明坡面径流对土壤分离和搬运除受径流含沙量影响外, 在很大程度上受降雨强度和土壤表面条件耦合作用的影响。

坡上方汇流引起坡下方的净侵蚀产沙量 B 值也受地表面条件的影响。在降雨强度为 70 mm h^{-1}和土壤含水量为 0.191 g g^{-1}时, B 值随坡上方汇流含沙浓度的减少而增大; 而在同样降雨强度下, 土壤含水量为 0.274 g g^{-1}时, B 值除开始较大外, 基本上保持一定值 (70 g min^{-1}) , 表明在此条件下, B 值基本上不受上方汇流含沙量的影响。在相同降雨和土壤含水量条件下, 有结皮时的 B 和 C 值皆显著高于无结皮时的对应值, 表明地表有结皮时, 上方汇流对下方坡面侵蚀产沙的影响更为强烈, 增沙作用更为显著。因此, 增加地面覆盖和改善土壤环境条件是消减地表结皮、减少土壤流失的有效措施。

2.3　降雨强度对坡面侵蚀产沙和搬运过程的影响

降雨强度对坡面侵蚀产沙过程具有显著影响。当降雨强度由 70 mm h^{-1}增加到 90 mm h^{-1}时, 在相同的地表面条件下, Sd 和 Sud 皆随降雨强度的增加而增大, 且 Sud 较 Sd 增加更明显。另一方面, 降雨强度对侵蚀产沙和搬运过程的影响也受地表面条件的影响, 前期土壤含水量越大, 降雨强度的影响程度也越大。同时, 降雨强度的增加, 也使坡上方汇流引起坡下部侵蚀产沙量 B 值和坡上方单位汇流引起的侵蚀产沙量增加。因此, 采取坡面径流就地入渗拦蓄的水土保持措施是防止坡面土壤侵蚀的关键所在。

2.4　细沟侵蚀过程对坡面侵蚀产沙的影响

试验结果表明, 当坡面以片蚀为主时, 坡面侵蚀产沙过程比较稳定, 上方汇流引起试验土槽的净侵蚀产沙(B 值) 基本上为一相对定值。如在降雨强度为 70 mm h^{-1}和土壤含水量小于田间持水量时, B 值除试验开始时为 115 g min^{-1}外, 基本上保持在 70 g min^{-1}; 但当坡面以细沟侵蚀为主时, 坡面侵蚀产沙过程变化相对强烈, B 值变化幅度较大。如试验处理 6, B 值变化于– 11.2~ 997 g min^{-1}。

侵蚀产沙量变化过程表明(图 1) , 坡面侵蚀产沙过程可明显分为三个阶段, 即降雨初期以溅蚀为主的阶段、片蚀为主阶段和后期的细沟侵蚀为主阶段。在降雨初期的溅蚀为主阶段, 坡下部的侵蚀产沙量基本上不受坡上方汇流汇沙的影响。此阶段发生历时大约为 8 min, 相当于坡耕地在降雨初期的侵蚀情况。片蚀为主阶段发生在 8~ 42 min 内, 此时坡面径流含沙量保持在 60~ 70 kg m^{-3}之间, Sd 和 Sud 变化相对稳定, 分别为 250~ 550 g min^{-1}和550~ 710 g min^{-1}。细沟侵蚀为主阶段发生在 42 min 后, 此时坡面径流含沙量变化于 100~ 260 kg m^{-3}, Sd 和 Sud 分别为 350~ 1 580 g min^{-1}和 770~ 2 820 g min^{-1}, 明显大于片蚀为主阶段时的含沙量及 Sd 和 Sud 值。表明细沟侵蚀搬运能力是片蚀的 1.4~ 4 倍。

细沟侵蚀搬运能力在降雨和地表条件一定时, 主要取决于坡面细沟侵蚀的发展过程。细沟侵蚀的发展过程主要反映在细沟沟头的前进、沟槽的加宽和加深等方面。由于试验过程中细沟形态变化很大, 不易测定, 下面通过细沟沟头前进速度的观测, 分析细沟侵蚀发育过程对坡面侵蚀产沙的影响。

图 2 表明了试验土槽的侵蚀产沙量与细沟沟头前进速度具有密切关系, 当供沙土槽和试验土槽连接时, 试验土槽接受供沙土槽汇流, 径流量增大且集中, 细沟发展迅速, 细沟沟头前进速度增大, 导致侵蚀产沙量迅速增大(峰值) ; 当供沙土槽和试验土槽分开时, 试验土槽径流量减少, 细沟发展减缓或停止, 细沟沟头前进速度减慢, 侵蚀产沙量也迅速减少(谷值) , 即坡面侵蚀产沙过程与细沟沟头前进速度发展过程具有同步性, 但由于坡面泥沙搬运过程滞

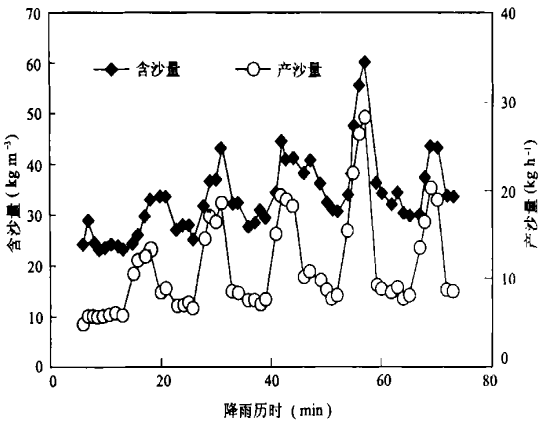

图 1 90 mm h^{-1}降雨强度下试验土槽含沙量与产沙量的变化过程

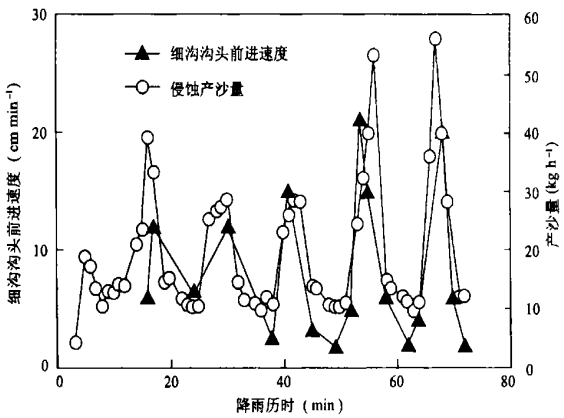

图 2 试验土槽产沙过程与细沟侵蚀过程的关系 (降雨强度 90 mm h^{-1}, 曲线中的峰值为试验土槽有上方径流汇入, 谷值为试验土槽无径流汇入)

后于径流对土壤的分离侵蚀过程, 因而, 坡面侵蚀产沙量的变化较细沟沟头前进速度滞后 1~ 2 min。

3 结 论

本文首次在国内利用双土槽系统径流小区, 定量刻画了在不同降雨强度和地表面条件下, 20° 坡面有坡上方汇流汇沙条件时的坡面侵蚀—沉积—搬运过程及其汇流汇沙对坡下方侵蚀过程和产沙量的影响。取得的主要研究结果为: 1) 坡上方汇流含沙浓度的变化, 可使坡下方侵蚀过程由侵蚀—沉积—搬运演变为侵蚀—搬运过程; 2) 上方汇流引起坡下部的净侵蚀产沙量 (B) 受上方汇流含沙量、特别是降雨强度与地表面条件相互耦合作用的影响; 3) 降雨强度的增加或土壤地表结皮的形成, 使 B 值的增加更为显著; 4) 坡面片蚀向细沟侵蚀的演变对坡下部侵蚀产沙过程和 B 值产生重要影响; 5) 细沟侵蚀搬运能力是片蚀的 1.4~ 4 倍。

参 考 文 献

[1] Ellison W D. Soil erosion study-Part Ⅰ. Agric. Eng., 1947a, 28: 145~ 146

[2] Ellison W D. Soil erosion study-Part Ⅱ: Soil detachment hazard by raindrop splash. Agric. Eng., 1947b, 28: 197~ 201

[3] Ellison W D. Soil erosion study-Part Ⅴ: Soil transport in the splash process. Agric. Eng., 1947c, 28: 349~ 351, 353

[4] Ellison W D, Ellison O T. Soil erosion study-Part Ⅵ: Soil detachment by surface flow. Agric. Eng., 1947d, 28: 402~ 405, 408

[5] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. ASAE., 1969, 12: 754~ 758, 762

[6] Meyer L D, Foster G R. Effect of rate and canopy on rill erosion. Trans. ASAE., 1975, 18(5): 905~ 911

[7] Nearing M A, Foster G R. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. Trans. ASAE., 1989, 32: 1 587~ 1 593

[8] Huang C, Well L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion process: Concept and reality. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 503~ 516

[9] Zheng F, Gao X. Effects of upslope runoff and sediment on erosion process at downslope area. Proceedings of International Symposium on Soil Erosion Research for 21st Century. Honolulu, Hawaii, USA, 2001. 163~ 166

中德土壤与环境联合实验室在中国科学院南京土壤研究所成立

经过中国国家自然科学基金会(NSFC)和德国科学基金会(DFG)的评审, 由中德科学基金研究交流中心资助的中德土壤与环境联合实验室在中国科学院南京土壤研究所正式揭牌成立。中国科学院南京土壤研究所周健民研究员任中方主任, 德国基尔大学植物营养和土壤学研究所教授R.Horn博士任德方主任。

成立后的中德土壤与环境联合实验室将致力于构建一个全国性的开放式平台, 促进中德两国研究机构的学生交流, 促进科学家学术交流和合作研究, 建立中德关于"土壤与环境"等相关领域的合作研究网络。其具体目标包括: 2003~ 2005 年间每年资助一定数量的中德科学家进行短期学术交流; 每年资助一次规模为30 人左右的双边学术讨论会; 资助出版学术专著和仪器设备; 支持有广泛代表性的双边学术会议产生的科研项目。同时通过该实验室, 中德科学基金研究交流中心将受理并资助由中德双方科学家提出的小型专题学术交流会。此外, 中德土壤与环境联合实验室还将为中德两国有关政府部门提供"土壤与环境"方面的科学发展咨询报告。

欢迎中国各科研单位与中德土壤与环境联合实验室联系, 以申请合作交流的资助。联系方式:

孙磊博士　　张斌博士
电话: 025- 86881506　　电话: 025- 86881198
传真: 025- 86881000　　传真: 025- 86881000
电子邮件: lsun@ issas. ac. cn　　电子邮件: bzhang@ issas. ac. cn
网址: www. sino-german-lab. issas. ac. cn
地址: 南京市北京东路 71 号　中国科学院南京土壤研究所　邮政编码: 210008