

# 旅游干扰对纳帕海湖滨草甸湿地土壤 水文调蓄功能的影响

张 昆<sup>1,4</sup>, 田 昆<sup>2</sup>, 吕宪国<sup>1</sup>, 罗 姗<sup>2</sup>, 李吉玉<sup>2</sup>, 李宁云<sup>3</sup>

(1. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 国家高原湿地研究中心, 云南 昆明 650224; 3. 云南省林业科学院, 云南 昆明 650204; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 在野外调查和室内分析的基础上, 研究了旅游干扰对纳帕海湖滨草甸湿地土壤蓄水功能和水文调节能力的影响。结果表明, 旅游干扰对草甸湿地上层土壤环境的破坏作用显著。随着旅游干扰强度增加, 草甸湿地 0~20 cm 表层土壤容重显著增加, 孔隙度减小, 土壤持水能力急剧下降, 以未受旅游干扰作为参照, 在轻度、中度和重度干扰下草甸表层土壤饱和和持水能力分别下降了 10%、48% 和 75%, 表明土壤蓄水功能在高强度旅游干扰作用下退化显著。未受旅游干扰区草甸湿地土壤有效调蓄水空间、非毛管孔隙度、初渗速率和稳渗速率分别为 1 897 g/kg、44%、3.14 mm/min 和 1.92 mm/min, 在重度干扰作用下分别下降了 77%、43%、94% 和 96%, 高强度旅游干扰作用下草甸湿地土壤水文调蓄功能显著退化。

**关键词:** 旅游干扰; 草甸; 湿地; 蓄水功能; 水文调节; 纳帕海

中图分类号: P343.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2009)06-0800-06

湿地是具有多功能的独特生态系统<sup>[1]</sup>, 处于低地的地貌条件和特有的水理特性赋予了湿地巨大的水资源调蓄功能。湿地系统的水陆交互作用孕育了独特的土壤环境, 湿地土壤特殊剖面结构使其水文物理特性体现出极强的持水和蓄水能力<sup>[2-3]</sup>, 具有巨大的水源涵养和水文调节功能。湿地系统的水陆交错特性也决定了其脆弱和不稳定的特性, 如果人类活动对湿地环境干扰达到一定程度, 自然状态下湿地土壤发育过程会受到严重冲击<sup>[4]</sup>, 尤其是湿地土壤水文物理性质趋向恶化, 减弱了湿地土壤蓄水空间, 制约着湿地土壤水文调节功能, 对区域水环境安全产生深远的影响。

位于青藏高原南缘的纳帕海国际重要湿地地处金沙江上游, 它调节着地表径流和冰雪融水, 对维持金沙江中下游水量平衡有着重要作用。纳帕海湿地湖滨草甸广布, 草甸湿地土壤具有开阔的卸载地表径流的集流空间, 对地表径流的调蓄功能非常突出。近年来, 纳帕海因其独特的高原湿地景观和浓郁的藏族风情已成为滇西北旅游胜地。旅游活动产生水平、垂直方向作用力重塑了土壤外部轮廓<sup>[5]</sup>, 对纳帕海湖滨草甸土壤环境造成直接和间接损害, 草甸土壤的水文调蓄功能出现不同程度退化, 加速了植被景观破碎化进程<sup>[6-7]</sup>, 制约着当地旅游开发的可持续发展, 因此, 在维持湿地功能正常发挥的同时又能确保当地旅游经营可持续发展是当务之急。本文分析了旅游干扰作用下湖滨草甸湿地土壤水文物理特性的空间变异特征, 揭示了不同旅游干扰强度对湿地土壤水文调蓄功能的影响, 探讨了湿地土壤水文调蓄功能对旅游干扰的响应机理, 以为湿地旅游资源合理开发以及湿地资源可持续利用提供科学依据。

收稿日期: 2009-01-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2005CB422005; 2008CB417210); 云南省科技计划资助项目 (2008CA006); 云南省林业厅湿地保护项目 (200612)

作者简介: 张 昆 (1981-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事湿地变化及其环境效应方面的研究工作。

E-mail: zhkunlx@163.com

通信作者: 吕宪国, Email: luxg@neigae.ac.cn

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区生态环境特征

纳帕海国际重要湿地位于滇西北香格里拉县城西部的纳帕海自然保护区内(99°37'~99°41' E, 27°49'~27°55' N),发育在高原夷平面陷落部分,四周山岭环绕,面积3760.4 hm<sup>2</sup>,相对孤立狭小,并且湖盆为石灰岩母质,生态环境极为脆弱<sup>[7-10]</sup>。纳帕海湿地独具高寒、年均温低、霜期长、干湿季分明及冬季漫长等特点,其海拔3260 m,年均温度5.4℃,最冷月平均温度-3.8℃,极端最高温24.5℃,最热月平均温度13.2℃,极端最低温-25.4℃<sup>[8]</sup>。湿地水量补给主要依靠降水,年平均降水量619.9 mm,受西南季风的影响,每年6、7月份形成大量降水,湖水水位上涨,湖面面积达到3125 hm<sup>2</sup>;石灰岩母质的湖盆因喀斯特作用强烈而被蚀穿在西北部形成10余个落水洞,湖水由此潜流汇入金沙江,湖水退落后,草甸湿地得以大面积发育。纳帕海湖滨草甸湿地面积1646.8 hm<sup>2</sup>,是纳帕海的主要景观类型。草甸植物多样性丰富,鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*)、斑唇马先蒿(*Pedicularis longiflora* var. *tubiformis*)、尼泊尔酸模(*Rumex nepalensis*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)和矮地榆(*Sanguisorba filiformis*)等为优势植物,其中,鹅绒委陵菜群落面积1356.0 hm<sup>2</sup>,占草甸湿地面积的82.4%。

### 1.2 研究方法

纳帕海湖滨草甸具有代表性的旅游景区有3处——依拉草原、达拉草原和春宗草原,3处景区游客数量基本相当,年均吸引游客10余万人。旅游活动主要以骑马旅游为主,但是经营策略的差异造成了对湖滨草甸的干扰程度存在很大差别:依拉草原旅游线路不确定,经常变换;达拉草原的旅游路线主要有两条,而在春宗草原只有一条旅游线路。因此,3处景区受到的干扰与胁迫作用存在差异,具体可将依拉草原、达拉草原和春宗草原分别依次划分为轻度干扰、中度干扰和重度干扰3个干扰梯度,同时选取基本未受旅游活动干扰的原生态草甸土壤作为参照,对比分析旅游干扰对土壤物理性质影响的梯度变化特征。

采样点选择在相同母质形成的草甸土上,土壤形成的立地、生物和气候条件基本一致,植物群落为鹅绒委陵菜群落,样点布设尽量远离草甸和沼泽化草甸湿地过渡地带,以使土壤性质空间异质性的影响最小化。在参照区、轻度干扰区、中度干扰区以及重度干扰区依据典型性和代表性的原则设置7~10个采样点,共计36个样点,每个样点设置3个重复,2006年5月初完成全部样点野外设置工作,并利用内径5 cm的IN-SITU取土管<sup>[17-18]</sup>采集0~40 cm原状土,旨在获取雨季前期土壤自然含水量;在纳帕海旅游季节末期10月初用IN-SITU取土管采集0~40 cm原状土,同时用土壤袋采集适量土壤以测土壤有机质含量,并在取样点附近利用目测法估测草甸植被覆盖度。将含原状土的IN-SITU取土管用金属切割机切成5 cm长与环刀(100#)相近的环筒,于实验室内测定土壤容重、土壤自然含水量、土壤饱和含水量和土壤渗透系数等物理性质,土壤有机质含量测定采用重铬酸钾法<sup>[19]</sup>。运用Microsoft Office Excel 2003和SPSS 11.5 for Windows等软件对实验数据进行统计分析。

## 2 结果分析

### 2.1 旅游干扰对草甸湿地土壤蓄水功能的影响

纳帕海湖滨草甸湿地上层土壤主要由草甸植物根系活体或已经死亡但未分解的根茎残体组成,富含粗有机质,质地疏松,其下发育有潜育层,土壤质地紧实,未受旅游干扰的草甸土壤容重随土层深度增加而增加,土壤孔隙度则呈相反趋势。表1为纳帕海湖滨草甸土壤样品容重和孔隙度测定结果。在旅游干扰作用下草甸0~15 cm表层土壤容重和孔隙度变化显著,而旅游活动对15~30 cm深层土壤容重和孔隙度的干扰作用微弱,表明旅游干扰对草甸土壤环境的影响主要集中在表层土壤。随着干扰强度增加,草甸表层土壤容重增加而土壤孔隙度迅速减小,尤其是中度干扰和重度干扰下草甸表层土壤容重和孔隙度变化极为显著;中度干扰区和重度干扰区草甸表层土壤容重分别为1.15 g/cm<sup>3</sup>和1.39 g/cm<sup>3</sup>,比未受干扰参照区分别增加了30%和56%,总孔隙度则分别相应下降了20%和32%。

表 1 旅游干扰对纳帕海湖滨草甸土壤容重和孔隙度的影响

Table 1 Impacts of tourism disturbances on meadow soil bulk density and porosity in the lakeshore of Napahai wetlands

干扰类型	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )		总孔隙度/%		非毛管孔隙度/%		毛管孔隙度/%	
	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm
未干扰参照区	0.89 ±0.04	1.32 ±0.08	68 ±2.5	50 ±2.7	44 ±4	28 ±4	24 ±4	22 ±3
轻度干扰区	0.92 ±0.07	1.34 ±0.06	65 ±1.6	49 ±2.0	42 ±3	27 ±4	23 ±3	22 ±4
中度干扰区	1.15 ±0.04	1.35 ±0.09	55 ±1.5	48 ±2.0	34 ±4	27 ±2	21 ±5	21 ±2
重度干扰区	1.39 ±0.08	1.35 ±0.10	46 ±2.9	48 ±3.1	25 ±5	27 ±3	21 ±2	21 ±5

湿地土壤的蓄水能力与土壤容重和孔隙度状况密切相关。湿地土壤蓄水量与容重负相关，与孔隙度正相关，容重越小，孔隙度越大，蓄水能力越大<sup>[12]</sup>。图 1 为纳帕海湖滨草甸湿地土壤饱和含水量测定结果。在未受旅游活动干扰的湖滨草甸表层土容重为 0.89 g/cm<sup>3</sup>，孔隙度为 68%，草甸土壤表现出极强的蓄水能力，0~15 cm 草甸表层土壤饱和持水量达到 2367 g/kg；在轻度干扰区，表层土壤饱和含水量为 2125 g/kg，与未受干扰区土壤的持水能力相当；但随着践踏干扰程度的增加，草甸土壤的持水能力急剧下降，在重度干扰区草甸土壤的饱和含水量为 587 g/kg，比未受干扰区草甸土壤饱和含水量下降了 75%；与未受干扰区、轻度干扰区以及中度干扰区不同，重度干扰区表层土壤的饱和含水量低于深层土壤的饱和含水量，表明高强度旅游干扰对草甸湿地土壤表层结构破坏作用极大，导致土壤蓄水能力显著下降。

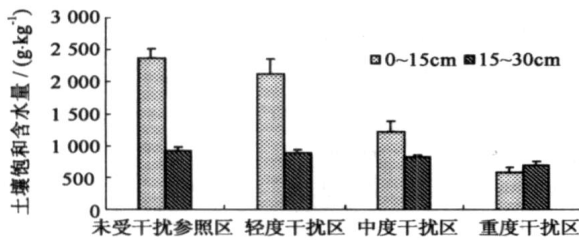


图 1 旅游干扰对纳帕海湖滨草甸土壤蓄水功能的影响  
Fig. 1 Impacts of tourism disturbances on the water storage of meadow soil in the lakeshore of Napahai wetlands

未受旅游活动干扰的湖滨草甸表层土容重为 0.89 g/cm<sup>3</sup>，孔隙度为 68%，草甸土壤表现出极强的蓄水能力，0~15 cm 草甸表层土壤饱和持水量达到 2367 g/kg；在轻度干扰区，表层土壤饱和含水量为 2125 g/kg，与未受干扰区土壤的持水能力相当；但随着践踏干扰程度的增加，草甸土壤的持水能力急剧下降，在重度干扰区草甸土壤的饱和含水量为 587 g/kg，比未受干扰区草甸土壤饱和含水量下降了 75%；与未受干扰区、轻度干扰区以及中度干扰区不同，重度干扰区表层土壤的饱和含水量低于深层土壤的饱和含水量，表明高强度旅游干扰对草甸湿地土壤表层结构破坏作用极大，导致土壤蓄水能力显著下降。

2.2 旅游干扰对草甸表层土壤渗透性能的影响

土壤渗透性是表征土壤对降水和地表径流的就地入渗和吸收能力，是土壤水文调节功能极为重要的特征参数之一，渗透率越大，土壤的水文调节能力越强<sup>[14-16]</sup>。

表 2 为纳帕海湖滨草甸土壤入渗能力与土壤孔隙状况相关性分析结果。草甸表层土壤初渗速率与总孔隙度和非毛管孔隙度相关系数(R<sup>2</sup>)分别为 0.988(P<0.05)和 0.994(P<0.01)；土壤稳渗速率与总孔隙度和非毛管孔隙度相关系数(r<sup>2</sup>)分别为 0.965(P<0.05)和 0.989(P<0.01)。土壤渗透性能与总孔隙度和非毛管孔隙度均为正相关关系，其中，非毛管孔隙状况对土壤渗透性的影响更为显著。

图 2 为不同干扰强度下纳帕海湖滨草甸土壤入渗能力测定结果。随着旅游干扰强度增加，草甸湿地表层土壤非毛管孔隙状况迅速恶化，土壤入渗速率也大幅度下降，在轻度、中度和重度干扰下土壤初渗速率分别比未受干扰时下降了 51%、82%和 95%，稳渗速率分别下降了 37%、78%和 97%。

表 2 纳帕海湖滨草甸土壤入渗速率与孔隙状况的相关性

Table 2 Correlation coefficients between meadow soil infiltration rate and porosity in Napahai wetlands

	初渗速率	稳渗速率	总孔隙度	非毛管孔隙度
初渗速率	1			
稳渗速率	—	1		
总孔隙度	0.988*	0.965*	1	
非毛管孔隙度	0.994**	0.989**	—	1

显著性检验：\* P<0.05；\*\* P<0.01。

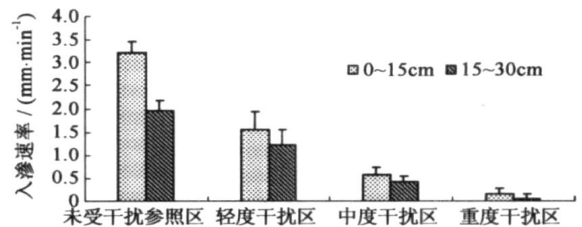


图 2 旅游干扰对纳帕海湖滨草甸土壤入渗速率的影响  
Fig. 2 Impacts of tourism disturbances on meadow soil infiltration rate in the lakeshore of Napahai wetlands

2.3 旅游干扰对草甸土壤水文调节功能的影响

湿地土壤非毛管孔隙状况对其水文调蓄功能的发挥具有极为重要的决定作用，水分在土壤非毛管孔隙中既

可通过重力作用做向下运动,同时也可做横向运动,沿不透水层由高到低补给湖泊、河流水量,对地表径流起到重要的均化调节作用。因此,土壤非毛管孔隙是重要的水调节空间。纳帕海湖滨草甸未受干扰参照区表层土壤非毛管孔隙度为44%,随着旅游强度增加,轻度干扰区、中度干扰区和重度干扰区表土层非毛管孔隙度逐渐减小,分别为42%、34%和25%,尤其在重度旅游干扰下草甸表层土壤非毛管孔隙度减小了43%(表1)。

湿地土壤水文调节功能与雨季前期土壤含水量密切相关,雨季前期土壤含水量的多少以及饱和持水量的大小决定了湿地土壤水调蓄空间。因此,饱和含水量与雨季前期土壤含水量差值是体现湿地土壤有效调蓄潜在能力的一个重要指标<sup>[13]</sup>。表3为纳帕海湖滨草甸土壤雨季前期自然含水量和饱和含水量的测定结果以及二者差值所得土壤有效调蓄水空间。未受干扰参照区与轻度干扰区表层土壤的有效调蓄能力相当,分别为1897 g/kg和1715 g/kg,重度干扰区表层土壤水文调节功能最差,其有效调蓄水空间仅为438 g/kg,比未受干扰参照区下降了77%之多;15~30 cm深层土壤有效调蓄水空间对不同旅游干扰强度的响应差异不显著,在参照区、轻度干扰区和中度干扰区深层土壤有效调蓄水空间均小于表土层,但在重度干扰区却相反,表明高强度旅游干扰严重破坏了湖滨草甸0~15 cm表层土壤的水文调节功能。

表3 旅游干扰对草甸土壤有效调蓄水空间的影响

g/kg

Table 3 Impacts of tourism disturbances on the hydrological space of meadow soil in Napahai wetlands

干扰类型	雨季前期含水量		饱和含水量		有效调蓄水空间	
	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm
未干扰参照区	470 ±4	429 ±7	2367 ±42	923 ±56	1897 ±36	494 ±23
轻度干扰区	410 ±8	408 ±6	2125 ±28	887 ±47	1715 ±21	478 ±34
中度干扰区	205 ±5	351 ±12	1222 ±32	815 ±24	1017 ±32	463 ±45
重度干扰区	149 ±5	250 ±16	587 ±14	695 ±58	438 ±11	445 ±36

### 3 讨 论

旅游活动对草甸湿地生态环境干扰作用首要表现为马匹踩踏对草甸土壤的压实作用,容重作为土壤紧实度的敏感性指标,在旅游干扰作用下,草甸表层土壤容重比未受干扰参照区增加了0.03~0.50 g/cm<sup>3</sup>。随干扰强度的增加,土壤容重增加,土壤变紧实,直接影响着土壤结构状况,在未受干扰参照区土壤结构多为团粒状,而在重度干扰作用下草甸土壤结构主要以团块状和块状为主,土壤结构变差也导致了土壤孔隙状况恶化,轻度、中度和重度旅游干扰区较未受干扰的表层土壤总孔隙度分别降低了4%、19%和32%,非毛管孔隙度分别下降了5%、23%和43%,表明草甸土壤非毛管孔隙对旅游干扰的响应更为敏感,土壤孔隙状况恶化主要是因非毛管孔隙受到旅游践踏破坏所致。

旅游践踏干扰对草甸植被覆盖度也有显著影响,在基本未受旅游活动干扰的参照区草甸植被覆盖度为90%~95%,而在高强度旅游干扰胁迫下的重度干扰区植被覆盖度降低到8%~12%。植被覆盖度降低直接导致土壤有机质来源量减少<sup>[17]</sup>,土壤水分含量降低<sup>[7]</sup>;同时,旅游践踏破坏了草甸表层的草根层,土壤氧化环境增强,加速了土壤有机质分解,促进了矿化作用<sup>[4]</sup>,草甸土壤有机质含量显著减少,未受干扰参照区表层土壤有机质含量为55.85 g/kg,而随着干扰强度的增加,轻度干扰区、中度干扰区和重度干扰区表层土壤有机质含量分别降低了9%、33%和63%。草甸土壤有机质含量降低,一方面不利于土壤良好结构形成,土壤容重增加,孔隙度减小;另一方面也破坏了土壤胶体状况,降低了土壤的吸附作用,土壤蓄水功能减弱。在未受干扰参照区,草甸植被茂盛,土壤有机质大量积累,土壤孔隙状况良好,较高的土壤孔隙度不仅有利于纵向水分渗透,而且有利于水分的横向运移,缩短了渗透时间,增强了土壤渗透性能;在高强度旅游干扰作用下,植被覆盖度和土壤有机质含量下降,土体极易松散<sup>[18]</sup>,土壤孔隙易堵塞,重度干扰区比未受干扰参照区草甸表层土壤初渗速率和稳渗速率分别下降了95%和97%。一旦遇上降雨或是上方来水,土壤初渗速率较低,稳渗时间变短,土壤水调蓄功能退化显著。

## 4 结 论

(1) 旅游活动对纳帕海湿地草甸表层土壤的干扰作用极为显著, 土壤容重随着旅游干扰强度的增加而增加, 土壤孔隙度的变化趋势则相反。受土壤容重和孔隙度变化的影响, 在中度干扰区和重度干扰区草甸表层土壤的蓄水功能显著降低, 高强度旅游活动严重破坏了湿地表层土壤的蓄水功能。

(2) 湖滨草甸湿地土壤特殊水文物理特性孕育了巨大的水文调蓄空间, 旅游干扰导致土壤有效调蓄水空间、非毛管孔隙度和入渗能力急剧下降, 土壤水文调节功能显著退化, 不同旅游干扰强度下草甸土壤水文调节功能比未受干扰参照区分别下降了 10%、46%和 77%。

(3) 旅游干扰下湖滨草甸湿地土壤水文调蓄功能退化机理一方面表现为旅游践踏导致草甸植被覆盖度降低, 有机质含量下降, 土壤吸附性能减弱, 持水能力下降, 土壤蓄水功能退化; 另一方面, 旅游活动对草甸土壤的踏实作用增强, 土壤容重增加, 土壤孔隙分布的空间格局发生变化, 土壤非毛管孔隙度降低, 渗透性能减弱, 土壤的水文调节功能严重退化。

### 参考文献:

- [1] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. (CHEN Yi-yu. Study of wetlands in China[M]. Changchun: Jilin Sciences Technology Press, 1995. (in Chinese))
- [2] 邓伟, 严登华, 何岩, 等. 流域水生态空间研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 341-345. (DENG Wei, YAN Deng-hua, HE Yan, et al. Study on ecological storeroom of water in the watershed [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3): 341-345. (in Chinese))
- [3] LU Xian-guo, LIU Hong-yu, YANG Qing, et al. Wetlands in China: Feature, value and protection[J]. Chinese Geographical Science, 2000, 10(4): 296-301.
- [4] 田昆. 云南纳帕海高原湿地土壤退化过程及驱动机制[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2004. (TIAN Kun. Mechanism and process of soil degradation in Napahai wetland on Yunna Plateau[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese))
- [5] 冯学刚, 包浩生. 旅游活动对风景区地被植物-土壤环境影响的初步研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 75-78. (FENG Xue-gang, BAO Hao-sheng. Preliminary research on tourism activity influence upon the soil and cover plant of scenic spot[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(1): 75-78. (in Chinese))
- [6] 李元寿, 王根绪, 丁永建, 等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 61-67. (LI Yuan-shou, WANG Gen-xu, DING Yong-jian, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 61-67. (in Chinese))
- [7] 李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 616-623. (LI Yuan-shou, WANG Gen-xu, WANG Yi-bo, et al. Impacts of land cover change on runoff and sediment yields in the headwater areas of Yangtze River and the Yellow River, China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 616-623. (in Chinese))
- [8] 赵魁义. 中国沼泽志[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (ZHAO Kui-yi. Mires of China[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [9] 田昆, 常凤来, 陆梅, 等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 681-686. (TIAN Kun, CHANG Feng-lai, LU Mei, et al. Impacts of human disturbances on organic carbon and nitrogen in Napahai wetlands, northwest Yunnan [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 681-686. (in Chinese))
- [10] 张昆, 田昆, 莫剑锋, 等. 水文周期对纳帕海高原湿地草甸土壤碳素的影响[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 705-709. (ZHANG Kun, TIAN Kun, MO Jian-feng, et al. Impacts of hydrological periods on organic matters in Napahai Wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 705-709. (in Chinese))
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analyses of soil physics and chemistry[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. (in Chinese))
- [12] 刘兴土. 东北湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (LIU Xing-tu. Wetlands in northeastern China[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))

- [13] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109. (SUN Yan-hong, ZHANG Hong-jiang, CHENG Jin-hua, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 106-109. (in Chinese))
- [14] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801-807. (ZHOU Bei-bei, SHAO Ming-an. Effect of content and size of rock detritus on infiltration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 801-807. (in Chinese))
- [15] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604-609. (WANG Hui-fang, SHAO Ming-an. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragment[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 604-609. (in Chinese))
- [16] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 471-476. (JIA Hong-wei, KANG Shao-zhong, ZHANG Fu-cang, et al. Spatial variability of soil water infiltration in the plain of Shiyang River Basin[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 471-476. (in Chinese))
- [17] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1771-1777. (WANG Gen-xu, CHENG Guo-dong, SHEN Yong-ping, et al. The affect of soil characteristic of vegetation cover change of land in alpine meadow[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(23): 1771-1777. (in Chinese))
- [18] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695. (ZHANG Xi-biao, SHANGGUAN Zhou-ping. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial Pinus tabulaeformis Carr forests of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3685-3695. (in Chinese))

## Impacts of tourism on water storage and regulation of meadow soil in Napahai lakeshore wetlands\*

ZHANG Kun<sup>1,4</sup>, TIAN Kun<sup>2</sup>, LU Xian-guo<sup>1</sup>, LUO Shan<sup>2</sup>, LI Ji-yu<sup>2</sup>, LI Ning-yun<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agriculture Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. National Plateau Wetland Research Center, Kunming 650224, China;  
3. Yunnan Academy of Forest, Kunming 650204, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The impact of the tourist disturbances on the water storage and regulation of the meadow soil is analyzed based on the field investigation and the laboratory analysis. The results show that tourist activities destroy the upper layer of the meadow soil badly. With the rise of the disturbance intensity, the soil bulk density increases in the upper 0~20 cm, the soil porosity and water holding capacity declines rapidly, and the saturated water content decreases by 10%, 48% and 75% in the slight, moderate and severe disturbance intensity, respectively. It indicates that the water storage of the meadow soil degrades badly. In the non-disturbance meadow soil, the hydrological spaces, the non-capillary porosity, the initial infiltration rate and steady infiltration rate are 1897 g/kg, 44%, 3.14 mm/min and 1.92 mm/min, while in strong disturbance area they decrease by 77%, 43%, 94% and 96%, therefore, the water storage and the regulation of meadow soil degrades badly by the tourist disturbances in Napahai lakeshore.

**Key words:** tourist disturbances; meadow; wetland; water storage; water regulation; Napahai

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2005CB422005; No. 2008CB417210).