

一种简单的盐沼地下水水位模拟方法

辛沛,金光球

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 为能更好地描述潮汐影响下的盐沼土壤通气条件,定义了描述盐沼土壤通气条件的一个新的变量浸水时段(参考土壤层饱和时段与潮汐周期的比值).建立了一个简化的盐沼-潮沟横断面模型,提出了一种简单的盐沼地下水水位模拟方法,对潮汐影响下盐沼地下水水位波动及浸水时段进行了模拟.模拟结果表明,无论淹没潮还是非淹没潮,潮沟附近都具有较好的通气条件,更适宜植物生长.

关键词 盐沼 潮沟 地下水水位 数值模拟

中图分类号 P343

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2008)04-0479-04

滨海盐沼指长有盐生植物(耐盐草、低矮灌木)并在潮汐作用下有规律地受海水浸涨的陆地,通常分布在温带和高纬度地区的海滩或河口湾^[1].滨海盐沼湿地的重要性体现在:(a)盐沼湿地通过营养物质交换影响近岸水域水质;(b)盐沼湿地生态对维持沿海生物多样性起到关键作用,丰富的植物分布为动物尤其是鸟类提供了良好的栖息场所;(c)盐沼湿地在全球生物地球化学循环中起着关键作用,湿地对温室气体CO₂的吸收^[2]可能会减缓全球变暖趋势;(d)盐沼湿地滤除了水中的污染物、过剩营养物和引发疾病的微生物,改善了水质^[3];(e)在海平面升高的威胁下,盐沼湿地的调节确保了海岸带的安全^[4].但是,对滨海湿地的盲目开垦和改造、生物资源的过度开发、水资源的不合理利用、污染的加剧、海岸侵蚀等原因造成盐沼面积急剧减少,盐沼功能和效益不断下降,因此全面开展盐沼湿地研究已刻不容缓.

盐沼一般分布着潮沟,潮汐作用下,涨潮时海水从外海进入潮沟,当潮沟水位高于潮沟岸坡地下水水位时,少许水从潮沟岸坡补给盐沼表层土壤孔隙水,海水漫漫潮滩时,地表水从沉积物顶部补给土壤孔隙水,地下水水位上升,改变甚至破坏植物通气条件^[5].落潮盐沼地下水水位高于潮沟水位时,盐沼孔隙水开始向潮沟排泄,空气进入土壤剩余孔隙.

Dacey等^[6-7]通过野外观测,发现盐沼内部潮沟附近植物长势最好.Li等^[5,6,8-9]对土壤通气的研究结果表明:最佳通气条件发生在潮沟附近.于是,很多人认为潮汐影响盐沼地下水流动及盐沼土壤通气条件,决定着盐沼植物带状分布规律.

盐沼受淹时段(hydro-period)常用于描述盐沼受淹情况.笔者认为,此参数不能很好地描述盐沼土壤通气条件,相同受淹时段,盐沼土壤通气条件不同(如潮沟附近饱和时段短).鉴于此,假定地下水水位高于土壤层时,该土壤层饱和,为浸水状态,以此定义新的变量浸水时段(P_S/P_T),即参考土壤层饱和时段 P_S 与潮汐周期 P_T 的比值来描述土壤通气条件.

本文建立了一个简化的盐沼-潮沟横断面模型,提出了一种简单实用的盐沼地下水水位模拟方法,通过潮汐作用下盐沼地下水水位波动的模拟,研究了潮汐振幅和土壤渗透特性对浸水时段的影响,并基于此对盐沼土壤通气条件进行了分析.

1 数学模型的物理条件及控制参数的确定

不考虑盐沼实际地形,简化盐沼结构及几何形状(图1),假设盐沼表面(AB)水平,底层设水平不透水层(CD),潮沟岸坡(AD)垂直,以潮沟为中心建立一个垂直潮沟的对称横剖面模型.由于模型以潮沟中心对称,图1

仅给出了潮沟的右半部分.潮波为长波,可将潮沟水位用潮位代替.不考虑长周期水位波动,本文潮位变化过程采用单一正弦曲线 $H_T = T_M + A_T \sin(2\pi/\omega)$.其中: H_T 为潮位; T_M 为平均海平面; A_T 为潮汐振幅; ω 为角速度.为方便起见,取半日潮周期为12 h.图1坐标系下,设定平均海平面位置为2.8 m,盐沼地面高程为4 m,不透水层(CD)及潮沟底高程为0 m,选取3个潮汐振幅,振幅为1 m时沉积物不受淹,振幅为1.5 m和2 m时沉积物最大淹没深度分别为0.3 m和0.8 m.因为本文采用的是一维 Boussinesq 方程,忽略地下水垂向流动,当渗透系数较小时,潮水不可能快速地从沉积物顶部充填,沉积物孔隙水垂向充填至土壤全部饱和的时段必定较长,所以存在较大误差,故只模拟渗透系数相对较高的方案.详细的模拟方案参数见表1.

2 数学模型及求解

2.1 数学模型

对图1所示盐沼横剖面模型做如下假定:(a)含水层均质,各向同性;(b)忽略毛细作用、径流补给,并且沉积物受淹时,盐沼土壤快速达到饱和状态,此时盐沼地下水水位全部取潮沟水位.沉积物暴露阶段采用一维 Boussinesq 方程. Montalto 等^[10]采用一维线性 Boussinesq 方程的解析形式对盐沼地下水水位进行了预测,预测结果与观测数据吻合较好.由此可见,基于一维 Boussinesq 方程可以简单地对盐沼地下水水位波动模拟.在图1所示坐标系下,沉积物暴露阶段本文采用一维非线性 Boussinesq 方程,并确定主控方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{S_S} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) & (H_T < L_{AB}) \\ H = H_T & (H_T \geq L_{AB}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数; H ——地下水水位; S_S ——有效孔隙度,本文取0.4; x ——水平坐标; L_{AB} ——盐沼表面AB高程; t ——时间.

2.2 求解方法

采用隐式差分格式离散方程式(1),整理后得

$$\frac{H_i^{k+1} - H_i^k}{\Delta t} = \frac{K}{S_S} \frac{1}{\Delta x} \left[H_{i+\frac{1}{2}}^k \frac{1}{\Delta x} (H_{i+1}^{k+1} - H_i^{k+1}) - H_{i-\frac{1}{2}}^k \frac{1}{\Delta x} (H_i^{k+1} - H_{i-1}^{k+1}) \right] \quad (2)$$

式(2)可采用追赶法求解.

2.3 定解条件

边界AD采用潮沟水位, $H_T = T_M + A_T \sin(2\pi/\omega)$,边界BC为无流量边界,边界CD为不透水边界.初始条件为 $H(x, 0) = T_M$,当 $H(t, x) - H(t - P_T, x) \leq 0.0001$ m时认为地下水水位波动达到动态稳定.

3 模拟结果分析

从图2(a)可见,非淹没潮($A_T = 1.0$ m)时,潮波经潮沟向盐沼土壤内部传播时受到土壤的阻碍,振幅衰减,相位滞后(离潮沟越远,地下水最高水位出现的时间较高潮时刻越滞后),且地下水水位变化不对称,地下水水位上涨快,下降慢,离潮沟越远,不对称越明显.这些现象与潮汐影响下滨海沙滩地下水水位波动相似^[11].从图2可见,随着离潮沟岸(图1中AD)距离 L 的增加,地下水水位波动范围逐渐减小,至盐沼内部 $L = 15$ m处地下水水位几乎不受潮沟水位波动的影响.此时,对于非淹没潮,盐沼内部地下水水位较低,能保证空气很好地进入土壤孔隙,为植物生长创造较好的通气条件.而对于淹没潮($A_T = 2.0$ m),盐沼内部地下水水位随着 L 的增加而增高,至盐沼内部 $L = 15$ m处地下水水位几乎不受潮沟水位波动的影响,与沉积物表面高程一致.可见,对于 $K = 0.360$ m/h, $A_T = 2.0$ m的淹没潮,远离潮沟15 m以外的盐沼土壤层在整个潮周一直处于浸水状态,此阶段,土壤中大量孔隙被水占据,土壤空气含量较低.

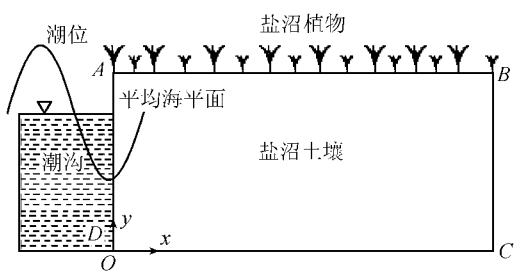


图1 盐沼横断面
Fig.1 Schematic cross-sectional diagram of a salt marsh

表1 计算方案选用参数

Table 1 Parameters used in simulation cases

方案	A_T/m	P_T/h	$K/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$
1	1.0	12	0.360
2	1.5	12	0.360
3	2.0	12	0.360
4	2.0	12	0.036

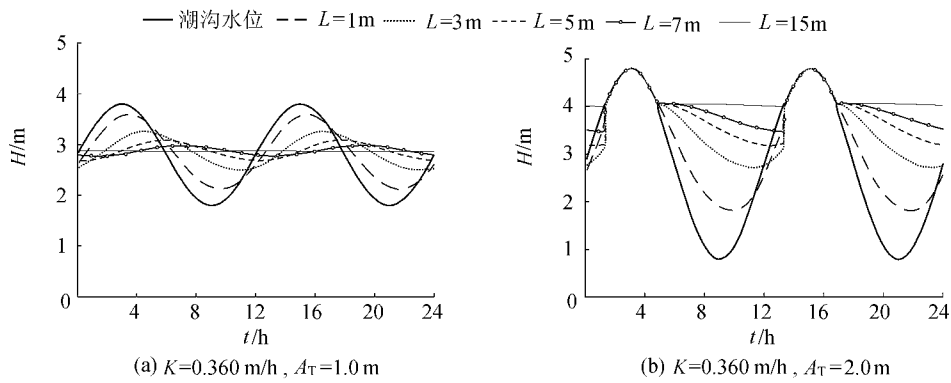


图 2 地下水水位随时间的变化曲线

Fig.2 Local groundwater table variation with time

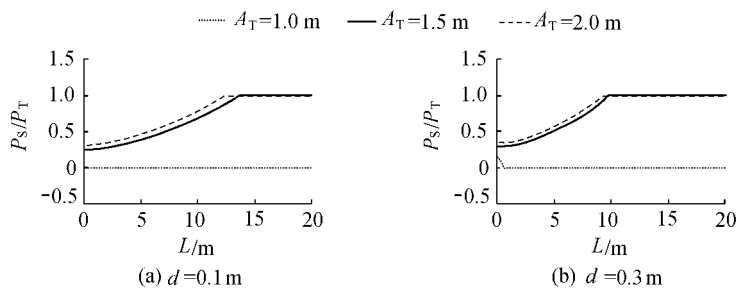


图 3 $K = 0.360 \text{ m/h}$ 时 P_S/P_T 随 L 的变化曲线

Fig.3 P_S/P_T variation with L at $K = 0.360 \text{ m/h}$

潮汐周期的 20%。对于淹没潮,由于潮水从沉积物顶部快速充填,而潮沟退水时,地下水受土壤阻碍很难排入潮沟,导致土壤表层浸水时段较长。从图 3 可见,潮汐振幅为 1.5 m 和 2.0 m 时, $L > 10 \text{ m}$ 的盐沼内部 0.3 m 深土壤层均处于饱和状态, $L > 14 \text{ m}$ 的盐沼内部 $d = 0.1 \text{ m}$ 的土壤表层也一直处于饱和状态。整体来说,淹没潮盐沼内部土壤浸水时段较长,但越靠近潮沟 $d = 0.1 \text{ m}$ 和 $d = 0.3 \text{ m}$ 的土壤层浸水时段均较短。

保持潮汐振幅($A_T = 2.0 \text{ m}$)不变,分析渗透系数变化对盐沼地下水水位的影响。从图 4 可见,对于潮汐振幅相同的淹没潮,渗透系数 $K = 0.036 \text{ m/h}$ 的盐沼比 $K = 0.360 \text{ m/h}$ 的盐沼 $d = 0.1 \text{ m}$ 和 $d = 0.3 \text{ m}$ 土壤层浸水时段均较长。 $K = 0.036 \text{ m/h}$ 时,距潮沟 4 m 范围外选取的 2 个参考盐沼土壤层在整个潮周均处于浸水状态。这说明盐沼土壤渗透系数越低,土壤沉积物内部孔隙水越难排出,沉积物内部浸水时间越长,相应的土壤夹气时段越短,不利于植物生长。但是,2 种不同渗透系数的土壤,潮沟附近的 2 个参考土壤层浸水时段都较低,距潮沟约 1 m 范围内,1 个潮周,2 个参考土壤层 60% 的时段处于地下水水位之上,此时段土壤大量孔隙未被水占据,空气可进入余下孔隙,为植物生长提供较好的通气条件。

保持渗透系数不变($K = 0.360 \text{ m/h}$),选取 2 个不同深度的土壤层(土壤层距地面深度 d 分别为 0.1 m 和 0.3 m)分析潮汐振幅变化对盐沼地下水水位的影响。从图 3 可见,非淹没潮土壤层水淹时段很短。从图 3 (a) 可见,潮汐振幅为 1.0 m 时潮沟最高水位低于 $d = 0.1 \text{ m}$ 土壤层高程,该土壤层不受水淹,将一直维持非饱和状态。从图 3 (b) 可见,0.3 m 深土壤层在潮汐振幅为 1.0 m 时潮沟水位超过当地地下水水位时仅在潮沟附近有上涨趋势,但最大淹没时段小于

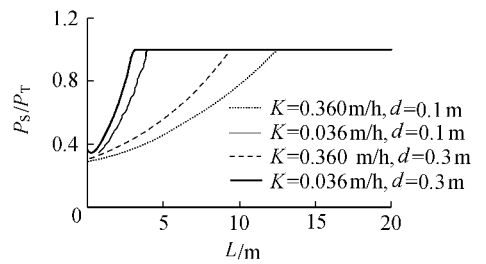


图 4 $A_T = 2.0 \text{ m}$ 时 P_S/P_T 随 L 的变化曲线

Fig.4 P_S/P_T variation with L at $A_T = 2.0 \text{ m}$

4 结 论

a. 本文定义了一个新的变量浸水时段 P_S/P_T ,即参考土壤层饱和时段 P_S 与潮汐周期 P_T 的比值。与目前常采用的受淹时段相比,这个变量能更好地描述盐沼土壤的通气条件。

b. 对于非淹没潮,盐沼内部地下水水位较低,说明非饱和土壤层较厚,此时植物根部通气条件较好,几乎不随离潮沟距离改变。对于淹没潮,盐沼地下水水位普遍较高,潮沟附近不同土壤层浸水时段均较短。可见,影响植物带状分布的主要是淹没潮,一旦沉积物受淹,潮水从沉积物表面有压入渗的速度很快,盐沼内部地下水水位很快被提升,但排泄阶段盐沼内部孔隙水极难以水平流排入潮沟,盐沼内部土壤较长时段必将处于浸水状态。虽然实际盐沼受淹次数较少,可是一旦受淹,形成的缺氧条件不利于植物生长。而无论淹没潮还是非淹没潮,潮沟附近都具有较

好的通气条件,说明潮沟附近更适宜植物生成,这与近来发现的盐沼潮沟附近植物长势最好的结果吻合^[6-7]。

c. 因为潮汐影响下地下水水位波动的振幅削减的程度仅取决于渗透系数和潮汐周期而不受潮汐振幅的影响,所以对于实际盐沼,可不计潮汐振幅变化及盐沼高程变化引起的最大淹没深度差异。那么,给定潮汐条件、土壤属性,离潮沟越远沉积物受淹后充填的潮水越难排出,空气也相应的难以进入植物根围土壤,盐沼内部植物生长环境应该较差。本文模拟结果表明,潮沟附近土壤浸水时间短,相应的通气时间较长,应该更适合盐沼植物生成。观测数据表明,一般盐沼土壤的饱和渗透系数在 $0.0036 \sim 0.0360 \text{ m/h}$ 之间^[12]。因此,根据本文模拟结果,半日潮影响下,如果只考虑盐沼土壤浸水条件,一般盐沼距潮沟 4 m 范围内应该更适合植物生长。

参考文献:

- [1] 时钟, PYE K, 陈吉余. 潮滩盐沼物理过程的研究进展综述[J]. 地球科学进展, 1995, 10: 19-30.
- [2] LIU X B, ELIZABETH J J, PETER V F J. Salt-marsh processes: a review[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12(12): 2167-2193.
- [3] VENEMAN L M, XING B H. Importance of hydrology, soil and vegetation in wetland research[J]. Wetland Science, 2003, 1(2): 128-135.
- [4] MONTALTO F A, STEENHUIS T S, PARLANGE J Y. The hydrology of Piermont marsh, a reference for tidal marsh restoration in the Hudson river estuary, New York[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316: 108-128.
- [5] LI H L, LI L, LOCKINGTON D. Aeration for plant root respiration in a tidal marsh[J]. Water Resources Research, 2005, 41: 1-11.
- [6] DACEY J W H, HOWES B L. Water uptake by roots controls water table movement and sediment oxidation in short *Spartina* marsh[J]. Science, 1984, 224: 487-489.
- [7] MENDELSSOHN I A, MCKEE K L, PATRICK W H. Oxygen deficiency in *Spartina alterniflora* roots: metabolic adaptation to anoxia[J]. Science, 1981, 214: 439-441.
- [8] ARMSTRONG W, WRIGHT E J, LYTHER S, et al. Plant zonation and the effects of the spring-neap tidal cycle on soil aeration in a Humber salt marsh[J]. Journal of Ecology, 1985, 73(1): 323-339.
- [9] NADIA U, SONIA S, MARCO M. Subsurface flow and vegetation patterns in tidal environments[J]. Water Resources Research, 2004, 40: 1-11.
- [10] MONTALTO F A, PARLANGE J Y, STEENHUIS T S. A simple model for predicting water table fluctuations in a tidal marsh[J]. Water Resources Research, 2007, 43: 1-22.
- [11] LI L, BARRY D A, PATTIARACHI C B. Numerical modelling of tide-induced beach water table fluctuations[J]. Coastal Engineering, 1997, 30: 105-123.
- [12] SIMONINI P, COLA S. Some pore pressure measurements at the marsh of S. Felice in the Venice lagoon[G]//Scientific Research and Safeguarding of Venice, CORILA Research Program 2001 Results. Venice: Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti, 2002.

A simple method for simulating groundwater table fluctuations in salt marshes

XIN Pei, JIN Guang-qiu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, the new variable P_S/P_T (the ratio of the saturated period to tidal period at a reference soil depth) is defined in order to better represent aeration conditions. A simplified tidal creek-marsh cross-sectional model is presented, and a simple method for simulating groundwater table fluctuations in salt marshes is introduced. The simulation results show that, whether the marsh platform is inundated or not, marsh plants can grow successfully near the tidal creek where the root aeration conditions are optimal.

Key words: salt marsh; tidal creek; groundwater table; numerical modelling