

温度对非饱和土土水特征曲线的影响研究进展

蔡国庆¹, 纪小彬²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 铁道第二勘察设计院, 四川 成都 610031)

摘要 总结了影响非饱和土土水特征曲线的因素, 包括固结压力、竖向应力、孔隙比、初始含水量、吸力范围等。分析温度对非饱和土土水特征曲线的影响, 从理论模型、影响机理和试验研究 3 个方面进行深入研究。研究表明: 当含水量一定时, 随着温度的升高, 吸力逐渐降低, 相应的土水特征曲线向下移动。最后, 在分析目前研究现状的基础上, 提出了进一步研究的方向。

关键词 温度效应 非饱和土 土水特征曲线 本构模型

中图分类号 P642.11+6

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2010)S1-0161-05

土水特征曲线 SWCC (soil-water characteristic curve) 是描述非饱和土中吸力与饱和度或体积含水量之间关系的曲线。实践表明, 吸力对非饱和土的力学性状有着不可忽视的影响作用, 而吸力又与土中的含水率密切相关。通过土水特征曲线, 可以反映出土体的许多重要性质, 如: 强度、体变、应力状态、渗透性等, 因此, 对非饱和土研究的一个关键问题就是确定其土水特征曲线。

目前对非饱和土土水特征曲线的研究大都是基于试验基础上展开的, 通过试验得出某种特定土体的土水特征曲线, 然后归纳出其数学表达式, 提出相应的模型。土水特征曲线的影响因素众多, 包括固结压力、竖向应力、孔隙比、初始含水量、吸力范围等。随着人们对非饱和土认识的不断深入以及工程建设的需要, 更多影响土水特征曲线的因素被发现并加以考虑。

在西部大开发过程中, 黄土高原地区将面临水利水电建设、水土流失综合治理等诸多工程建设问题, 其所遇到的黄土大都处于非饱和状态。天然状态下, 其温度变化引起的水分迁移将直接导致含水量的变化, 从而进一步引起导热性能改变以及应力场、位移场的重分布。非饱和土温度和含水量的变化, 以及由此引起的土体强度和冻融状态等的变化, 还会导致水利工程中的冻胀、塌岸、砌体开裂等病害的发生, 产生严重的后果。南水北调工程中, 非饱和土理论在膨胀土渠坡稳定等工程关键技术中得到广泛应用, 但温度的影响尚未加以考虑。

此外, 在高放核废料地质处置库建设中, 作为缓冲/回填材料的非饱和膨润土是一道重要的人工屏障, 它受到来自于核废料放热产生的温度荷载作用; 在地下电缆埋设过程中, 由于电缆的长时间通电发热, 使电缆附近的土体温度逐渐升高。这些都使得在热源附近的非饱和土中的吸力、水汽分布等受温度影响而发生变化, 最终引起土的基本性质的改变。因此, 对考虑温度效应的非饱和土土水特征曲线研究, 有着重要的理论和工程意义。

1 土水特征曲线影响因素

1.1 固结压力

Kawai 等^[1]研究了固结压力对土水特征曲线的影响, 通过对非膨胀性非饱和土的试验研究表明: 土体的固结压力越大, 土水特征曲线越平缓, 进气值越大, 同吸力下土体的饱和度越高。

1.2 竖向应力

Sharma^[2]研究了竖向应力对土水特征曲线的影响, 通过对高岭土和蒙脱土混合试样的试验研究表明: 竖向压力越大, 土水特征曲线的滞回圈面积越小, 同吸力下对应的饱和度越高。Vanapalli 等^[3]在试验中引入“等效应力”概念, 通过不同孔隙比间接研究应力历史的影响。试验结果表明: 竖向压力对土水特征曲线的影响与固结压力相似。Ng 等^[4]通过对香港地区风化的火山碎屑土的研究, 在试验压力不高的条件下 (40 kPa, 80 kPa), 验证了 Vanapalli 等^[3]结论的正确性, 同时还得到了吸力循环下非饱

和土的滞水性能。

1.3 孔隙比

Kawai 等^[1]研究了孔隙比对土水特征曲线的影响,得出了孔隙比越小,空气进气值越大的结论。刘艳华等^[5]通过对河南南阳膨胀土的试验研究,得出了相同的结论。孙德安等^[6-8]指出:包括固结应力和竖向应力在内的应力状态并不是影响土水特征曲线的最直接因素,而只是间接因素。对于某一特定土样来说,在不考虑温度影响时孔隙比是影响土水特征曲线的主要因素。通过试验,孙德安还给出了不同孔隙比下的土水特征曲线,当孔隙比增大时,同一含水量对应的吸力值减小,对应的土水特征曲线下移。

1.4 初始含水量

Vanapalli 等^[3]研究了初始含水量对土水特征曲线的影响,通过对砂质黏性冰土的试验研究发现:含水量越小,不同压力对土水特征曲线的影响越明显;随着含水量的增大,压力的影响逐渐减弱。

1.5 吸力范围

Vanapalli 等^[3]还通过试验得到了不同等效压力下的土水特征曲线,从而进一步研究了吸力范围对土水特征曲线的影响,研究表明:当吸力大于 10 000 kPa 时,含水量、竖向压力等因素对曲线的影响很小,曲线逐渐收敛。

2 温度对土水特征曲线的影响

土水特征曲线 SWCC 是研究非饱和土水力滞回、渗流以及强度和变形的重要曲线。土水特征曲线的影响因素众多,包括固结压力、竖向应力、孔隙比、初始含水量、吸力范围等。然而,随着理论研究的深入和工程实践的需求,考虑温度对土水特征曲线的影响越来越受到人们的重视。

2.1 理论模型

a. 基于 Laplace 方程模型。作为第 1 个近似计算土体内保水性质的方法,Laplace 方程将影响毛细压力的因素归结为:孔隙尺寸、浸润相和非浸润相流体之间的表面张力、流体接触面的接触角以及土颗粒表面性质。若将土体内的孔隙表示成毛细管,则毛细压力(吸力)可表示为

$$p_c = p_g - p_l = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \tag{1}$$

式中: p_c 为毛细压力; p_g 为气压力; p_l 为水压力; σ 为表面张力; θ 为接触角; r 为毛细管的平均有效半径。

Philip 等^[9]认为,在研究由于温度梯度引起的多孔介质中的水分迁移时,假定只有 σ 依赖于温度的变化。对式(1)两边温度求导,则有:

$$\partial s / \partial T \Big|_w = \frac{2 \cos \theta}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial T} = \frac{s}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \tag{2}$$

式中: s 为吸力,等于毛细压力 $p_g - p_l$; T 为当前温度值; w 为含水量(保持不变)。

此处,Philip 等认为 s 和 $p_g - p_l$ 是相等的,这在吸力较低的情况下是成立的,因为此时保水性能主要是由于毛细作用引起的^[10]。而在吸力较高的情况下,保水性能则主要与土颗粒和与之接触的孔隙水之间的物理化学作用有关,此时,严格来讲式(2)将不再适用。尽管如此,式(2)仍被公认为是考虑温度效应对非饱和土中吸力影响的首次尝试。

b. 基于双电层理论模型。根据扩散双电层理论:一方面,随着温度的升高,扩散双电层的厚度将随之增加,从而使得在表面电荷保持不变的前提下,表面电位(电势)降低;另一方面,温度的升高也导致了孔隙水的介电常数的降低。因此,Mitchell^[11]得出结论:温度的改变对双电层的厚度以及吸附水的数量没有显著的影响。

c. 基于 Kelvin 方程模型。Fredlund 等^[12]基于 Kelvin 方程,提出了非饱和土中的总吸力与蒸汽空间的相对湿度的关系方程:

$$s_t = - \frac{RT}{M_w (1/\rho_w)} \ln \left[\frac{RH}{100} \right] \tag{3}$$

式中: s_t 为土中的总吸力,kPa; R 为通用气体常数,取 8.314 32 J/mol·K; T 为开尔文绝对温度; M_w 为水的分子量,取 18.016 kg/kmol; ρ_w 为水的比重,kg/m³,为温度的函数; RH 为相对湿度,定义为 u_v/u_{v0} ,其中 u_v 为当前状态孔隙蒸汽压, u_{v0} 为同温度下的饱和状态的孔隙蒸汽压。

由式(3)可知,水的比重和饱和蒸汽压都是温度的函数,所以总吸力也将是温度的函数。但是,由式(3)所确定的温度变化引起的总吸力的变化并不显著。

d. 基于热力学理论模型。高燕希等^[13]根据热力学理论,讨论了非饱和土中的吸力随温度变化的规律。在 Fredlund 等^[12]所提出的吸力表达式基础上,分别研究了温度对纯净水水平面上方的饱和蒸汽压 $\bar{u}_{v0}$ 、土中孔隙水弯曲液面上的饱和蒸汽压 $\bar{u}_v$ 的影响。将土颗粒简化为等粒径的圆球,基于液相、蒸汽相之间的相平衡条件,给出了 $\bar{u}_{v0}$ 和 $\bar{u}_v$ 之间的关系,以此得出了吸力随温度升高线性减小的规律。

2.2 影响机理

事实证明,温度对非饱和土土水特征曲线有着不可忽视的影响,但是这种影响究竟来自于何种作用效应?吸力受温度影响时,土体的内部作用机理是怎样的?这些都引起了众多研究者广泛探究。

Gardner^[14], Chahal^[15-16], Haridasan 等^[17], Hopmans 等^[18], Nimmo 等^[19], Constantz^[20], She 等^[21], Bachmann 等^[22] 都针对温度的影响开展了大量的试验研究,研究表明:实际试验中由于温度导致吸力的变化远远超出了式(2)预测的结果,也就是说,温度对非饱和土吸力的影响不能仅仅归结为 σ 对温度的依赖。

为了阐明上述试验结果与 Philip 等^[9] 提出的公式的不一致性,找到除了表面张力以外,温度对吸力产生影响的其他内在机理,众多学者开展了大量的研究工作。Chahal^[15-16] 将这种不一致归结为由于温度的升高导致了毛细管内残余空气的热膨胀。Hopmans 等^[18] 认为,综合考虑表面张力和残余空气体积,将使温度对滞水曲线的影响趋于最小化。Nimmo 等^[19] 则认为土体内有机质的存在,增大了温度对表面张力的影响。

在此研究的基础上,Grant 等^[23] 对 Philip 等^[9] 提出的吸力随温度变化公式进行了修正,引入了温度对浸润角的影响,并通过试验对提出的修正公式进行了验证。结果表明,综合考虑了 σ 和浸润角同时受温度的影响后,试验结果与公式预测结果趋于一致。Grant^[24] 则进一步指出,该预测公式仅适用于低吸力情况。

2.3 试验研究

近些年来,随着试验技术的提高,在理论模型和内在机理研究的基础上,众多学者开展了温度对非饱和土土水特征曲线的试验研究。

She 等^[21] 以 Van Genuchten^[25] 和 Grant 等^[23] 的模型为基础,通过对含氧化硅砂土试样的试验研究发现, σ 和 θ 都同时受到温度变化的影响,他们的共同变化导致了吸力的变化。当含水量一定时,温度的升高还将导致毛细压力、不可恢复的含水量、残余非浸润相(蒸汽相)饱和度的减小。Bachmann 等^[22] 在对 3 种不同类型土样进行试验研究的基础上,也得出了相同的结论。

Liu 等^[26] 假定:非饱和土中的水有 2 种存在形态,一种是存在于孔隙间的连通的水,另一种是被土颗粒包围而隔离的水,而试验中测得的压力水头值仅仅是由连通水决定的。温度的升高将引起隔离水向连通水流动,导致连通水的增加,从而对滞水性能产生影响。在该假定基础上,连通水将随着总含水量线性变化,据此得出压力水头随温度的变化关系。

Romero 等^[27] 以 Boom 黏土为研究对象,开展了温度对吸力影响的试验研究。试验结果表明:当含水量保持某一定值不变时,20℃ 时的吸力值大于 80℃ 时的吸力值。Romero 等^[27] 将温度引起吸力变化的原因归结为“水气界面表面张力的变化、黏土土

体结构的变化以及孔隙水化学成分的变化。其中,后 2 种变化为不可逆变化过程,然而,当土体的有机质含量较低时,后 2 种变化对吸力的影响不显著(温度变化范围为 20 ~ 80℃)。因此,当温度变化时,非饱和土中总吸力变化的主要原因仍是温度引起了毛细力(或表面张力)的改变。

Arifin 等^[28] 也开展了温度对非饱和土吸力影响的相关试验研究,他们分别以 Calcigel 钙膨润土、石英砂的混合物(各占 50%)以及纯 Calcigel 钙膨润土为研究对象,在 80℃ 下,运用 3 种不同的吸力测试方法(冷镜式湿度仪、非加温式电容传感器、加温式电容传感器)对试样中吸力进行了量测,将 20℃ 和 80℃ 下量测到的吸力结果进行了对比分析。采用 Grant 等^[23] 提出的计算模型与实测数据比较分析表明:温度对总吸力的影响明显,当含水量一定,80℃ 时吸力值明显低于 20℃ 时吸力值。

Jacinto 等^[29] 采用 van Genuchten^[25] 提出的土水特征曲线方程,并考虑 Philip 等^[9] 提出的吸力公式,得到含温度影响的土水特征曲线方程为

$$w = w_{sat} \left[1 + \left(\frac{s}{p} \right)^{1/(1-\lambda)} \right]^{-\lambda} \quad (4)$$

其中 $s = \frac{s_0 \sigma}{\sigma_0}$ $p = \frac{p_0 \sigma}{\sigma_0}$

式中 λ 为试验拟合参数。

假定当前 s 和 p 均和参考情况下的值呈线性关系,通过试验数据可以拟合得到上述结果。通过对不同初始含水量的 MX-80 班脱土进行试验研究(试验温度在 20 ~ 100℃ 之间),并将试验结果与模型预测结果进行比较。分析表明:在高温、低吸力情况下,实测吸力值低于模型预测值且偏差相对较大,说明此时温度对滞水性能的影响不仅仅限于表面张力。

Romero 等^[30] 基于蒸汽平衡技术和轴平移技术,对温度影响非饱和土滞水性能开展了大量的试验研究。通过吸力一定时不同温度下的含水量测定、孔隙比一定时不同温度下的滞回曲线测定,得出了土水特征曲线随温度和干密度的变化。在试验基础上,对 van Genuchten^[25] 的土水特征曲线方程进行了修正:

$$\frac{w}{w_{sat}} = S_r = C(s) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_T s)^n} \right]^m \quad (5)$$

式中: S_r 为饱和度; α_T, m, n 为试验参数, α_T 与土的进气值有关, $\alpha_T = \alpha_r \left(\frac{a_1 + b_1 T_r}{a_1 + b_1 T} \right)^{b_1}$, 其中 α_r 为参考温度时的 α_T , a_1, b_1 为经验参数, T_r 为参考温度值; $C(s)$ 为修正因子, $C(s) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)}$, 其中 ψ 为对应于残余含水量的吸力值, ψ_r 为试验参数。

王铁行等^[31]取扰动黄土为研究对象,测得了不同密实度和温度下黄土土样的土水特征曲线。试验资料表明 密度变化引起基质吸力的变化非常显著。相对而言,温度变化引起基质吸力的变化不显著。对于一定含水率的土样,温度变化引起的吸力变化值在高含水率时较小,可以忽略不计,而在低含水率时较大 温差越大,吸力变化越大。采用数值拟合的方法得到综合考虑温度和密实度影响的 SWCC 方程。

近十年来,研究温度对非饱和土滞水性能的影响成为研究热点之一,例如 Romero 等^[10], Villar 等^[32-33,35], Tang 等^[34]。综合他们的研究成果,可以得出以下结论 对密实土样,当含水量较高时,温度对土水特征曲线的影响主要是由于表面张力的变化 而当含水量较低时,温度的影响则主要取决于土颗粒与水之间的相互作用。

3 研究现状分析

总体而言,目前关于温度对非饱和土土水特征曲线影响的研究尚处于起步阶段,进一步研究的空间较大。现有的研究成果表明 随着温度的升高,非饱和土中的吸力随之减小,对应的土水特征曲线向下移动。纵观国内外文献,考虑温度对非饱和土土水特征曲线的研究多从土壤学出发,而在岩土工程中,受试验仪器的制约,大多数研究是先选择合适的理论模型进行模拟,然后与试验结果进行比对。有限的理论模型研究也大都基于经验认识,缺乏严格统一的理论基础。而对温度影响土水特征曲线的内在机理更是处于争论阶段,尚未形成统一的认识和系统的理论。所有这些都将成为进一步研究的重点。

4 结 语

非饱和土在自然界分布广泛,工程中土坡、土坝、路基填土等大都处于非饱和状态,对非饱和土的研究具有重要的意义。尤其是近些年来在对西部大开发过程中的黄土、高放核废料地质处置中缓冲材料(膨润土)的研究中,非饱和土中温度-水力-力学耦合作用越来越受到人们的关注。因此,综合国外的经验可以看出,以研究温度对非饱和土土水特征曲线的影响为基础,从理论和试验两方面开展考虑温度效应的非饱和土本构模型研究,将对非饱和土力学的发展以及我国一系列重大工程建设产生积极的推动作用。

参考文献:

[1] KAWAI K, KATO S, KARUBE D. The model of water retention curve considering effects of void ratio[C]//Rahardjo

H. Unsaturated Soils for Aisa. Rotterdam : Balkema,2000 : 329-334.

[2] SHARMA R S. Mechanical behavior of unsaturated highly expansive clays[D]. London : University of Oxford,1998.

[3] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique,2001,51 (6) 573-576.

[4] NG C W W, PANG Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(2) 157-166.

[5] 刘艳华,龚壁卫,苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察,2002(3) 8-11.

[6] SUN De-an, SHENG D C, XU Y F. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal,2007,44(6) 673-686.

[7] 孙德安. 土水特征影响因素的试验研究[C]//陈云敏. 土工测试新技术 第25届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州 浙江大学出版社,2008 211-215.

[8] 孙德安. 非饱和土的水力和力学性状耦合的弹塑性模拟[C]//姚仰平. 第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京 北京航空航天大学, 2008 230-239.

[9] PHILIP J R, De VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. Transactions-American Geophysical Union,1957,38(2) 222-232.

[10] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19 : 311 - 322.

[11] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York : John Wiley,1993.

[12] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York : John Wiley,1993.

[13] 高燕希,符力平. 非饱和土吸力的温度性质[J]. 力学与实践,2003,25 55-57.

[14] GARDNER R. Relation of temperature to moisture tension of soil[J]. Soil Science,1955,79(4) 257-265.

[15] CHAHAL R S. Effect of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media [J]. Soil Science, 1964,98(2) :107-112.

[16] CHAHAL R S. Effect of temperature and trapped air on matric suction[J]. Soil Science,1965,100(4) 262-266.

[17] HARIDASAN M, JENSEN R D. Effect of temperature on pressure head-water content relationship and conductivity of two soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1972, 36 703-708.

[18] HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soilwater retention curves[J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50 562-567.

[19] NIMMO J R, MILLER E E. The temperature dependence of isothermal moisture vs potential characteristics of soils [J].

- Soil Science Society of America Journal,1986,50 :1105-1113.
- [20] CONSTANTZ J. Comparison of isothermal and isobaric water retention paths in nonswelling porous materials [J]. Water Resources Research,1991,27(12) :3165-3170.
- [21] SHE H Y, SLEEP B E. The effect of temperature on capillary pressure—saturation relationships for air-water and perchloroethylene-water systems [J]. Water Resources Research,1998, 34(10) :2587-2597.
- [22] BACHMANN J, HORTON R, GRANT S A, et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66 :44-52.
- [23] GRANT S A, SALEHZADEH A. Calculation of temperature effects on wetting coefficients of porous solids and their capillary pressure functions [J]. Water Resources Research, 1996,32(2) :261-270.
- [24] GRANT S A. Extension of temperature effects model for capillary pressure saturation relations [J]. Water Resources Research,2003, 39(1) :1003.
- [25] Van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44 :892-898.
- [26] LIU H H, DANE J H. Reconciliation between measured and theoretical temperature effects on soil water retention curves [J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57 :1202-1207.
- [27] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curve of deformable clays [C]//Tarantino M. Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Rotterdam : Balkema, 2000 :91-106.
- [28] ARIFIN Y F, AGUS S S, SCHANZ T. Temperature effects on suction characteristic curve of bentonite-sand mixtures [C]// Miller GA ZC, Houston S L, Fredlund D G. Proceedings of 4th International Conference on Unsaturated Soils. Carefree, Arizona, USA, 2006 :1314-1325.
- [29] JACINTO A C, VILLAR M V, ROBERTO G E, et al. Adaptation of Van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites[J]. Applied Clay Science, 2009,42 :575-582.
- [30] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001,19 :311-332.
- [31] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(1) : 1-5.
- [32] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite [J]. Applied Clay Science, 2004,26 :337-350.
- [33] VILLAR M V, MARTÍN P L, LLORET A. Determination of water retention curves of two bentonites at high temperature [C]//TARANTINO A, ROMETO E, CUI Y J. Advanced experimental unsaturated soil mechanics. London : A. A. Balkema Publishers, 2005 :77-82.
- [34] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX-80 clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42 :287-296.
- [35] VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R. Retention curves of two bentonites at high temperature [C]//Experimental Unsaturated Soil Mechanics (Springer Proceedings in Physics), 2007, 112 :267-274.

(收稿日期 2009-04-28 编辑 方字形)

(上接第 131 页)和产业结构推行清洁生产、实行达标排放,根据建立的排污口管理档案,加强入河排污口的监督管理,核定水域纳污能力,限制排污总量,加大工业废水的处理力度以及关停污染严重企业、筹建城市集中污水处理厂、居民小区污水处理设施、排污管网改造;进行清污分流、导污以及入河排污口整治和严格控制设置排污口等综合治理措施,防治水污染,保护水资源,实现国民经济的可持续发展。区内保护水资源的任务是:①加强对现有污染源的控制与防治,加强废水的处理力度和增加废水的回收利用率,使废水资源化,改善排污口下游水质;②要防止项目扩建、新建、改建等带来新的环境污染,期望这些地区的地表水水质达到Ⅲ类水质标准。

d. 缓冲区。属省界河段,区内人类活动相对较

少,污染较轻,水体现状水质为Ⅱ、Ⅲ类水,水质良好,基本上达到地面水环境质量标准Ⅲ类水,可用于集中式生活饮用水水源地二级保护区,一般鱼类保护区及游泳区,有望保持目前现状,区内若要提高开发利用程度,应采取相应的保护措施,防止该区水体的水质污染。

参考文献:

- [1] 方子云.水资源保护工作手册[M].南京:河海大学出版社,1988.
- [2] 《水和废水检测分析方法》编委会.水和废水检测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1997:97-99,102-103,153-155.
- [3] 甘肃省水文水资源勘测局.甘肃省入河排污口调查成果[R].兰州:甘肃省水文水资源勘测局,2008.

(收稿日期 2010-06-08 编辑 高渭文)